

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jerkko Starck

**NOPEAAN PYROLYYSIIN PERUSTUVAN BIOÖLJYN  
TUOTANTOLAITOKSEN LIKETOIMINNALLINEN MALLI JA  
KANNATTAVUUSLASKENTA SAVONLINNAN SEUDULLA**

Työn tarkastajat:

Professori Esa Vakkilainen  
SkogD Kari Liukko

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jerkko Starck

### **Nopeaan pyrolyysiin perustuvan bioöljyn tuotantolaitoksen liiketoiminnallinen malli ja kannattavuuslaskenta Savonlinnan seudulla**

Diplomityö

2011

85 sivua, 13 kuvaa, 18 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen  
SkogD Kari Liukko

Hakusanat: Pyrolyysiöljy, bioöljy, nopea pyrolyysi, kannattavuus  
Keywords: Pyrolysis oil, bio-oil, fast pyrolysis, profitability

Pyrolyysiöljy on biomassasta nopealla hapettomalla lämpökäsittelyprosessilla valmistettavaa nestemäistä polttoainetta. Kasvavien uusiutuvan energian käyttötavoitteiden myötä pyrolyysiöljystä on tullut varteenotettava vaihtoehto fossiilisille polttoöljyille. Suurimmat käytön haasteet ovat alhainen lämpöarvo, happamuus ja korkeahkot kiintoainepitoisuudet verrattuna fossiilisiin polttoöljyihin. Nämä haasteet ovat kuitenkin ratkaistavissa. Työssä tarkasteltiin bioöljyn tuotantolaitoksen liiketoiminnallista mallia ja kannattavuutta Savonlinnan seudulle sijoitettuna. Tätä varten selvitettiin alueellinen raaka-aineen saatavuus ja hinta, sekä potentiaaliset markkinat pyrolyysiöljylle. Kannattavuuslaskentaa varten luotiin exel – pohjainen laskentatyökalu, jolla laskettiin pyrolyysiöljyn tuotannon omakustannushinnat ja kannattavuudet eri laitosvaihtoehdoille. Saaduille tuloksille tehtiin herkkyysanalyysi, jolla selvitettiin merkittävimmät kannattavuuteen vaikuttavat tekijät. Laskettujen tulosten perusteella pienemmät 100 BDMTPD (Bone Dry Metric Ton per Day) tuotantolaitokset eivät ole kannattavia investointeja. Suuremmat 400 BDMTPD tuotantolaitokset ovat kannattavia, kunhan raaka-aine saadaan kohtuulliseen hintaan ja investointikustannukset pysyvät kurissa.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Department of Energy and Environmental Technology

Jerkko Starck

### **The business model and commercial profitability of fast pyrolysis-based bio-oil production facility in Savonlinna region in Finland**

2011

85 pages, 13 figures, 18 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen  
SkogD Kari Liukko

Keywords: Pyrolysis oil, bio-oil, fast pyrolysis, profitability

Pyrolysis oil is a liquid fuel oil produced by thermal treatment of biomass in the absence of oxygen. As the utilization targets for renewable energy are increasing, pyrolysis oil has become a notable option for fossil fuel oils. The greatest challenges in the use of pyrolysis oil are a lower heating value, greater acidity and higher solid content compared to fossil fuel oils. These challenges are however solvable. In this thesis, the commercial profitability and business model of bio-oil production facility in Savonlinna region in Finland, was examined. For this purpose, the regional biomass availability, price and potential markets for pyrolysis oil were evaluated. An excel – based tool was created to calculate the cost price of pyrolysis oil production and profitability of pyrolysis oil production in four different scenarios. A sensitivity analysis was carried out for the calculated results and the most notable variables were identified. The results of the calculations indicate that smaller 100 BDMTPD (Bone Dry Metric Ton per Day) facilities were not profitable investments. The bigger 400 BDMTPD facilities were profitable as long as the cost of biomass is reasonable and the gross investment remain fair.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty Savonlinnassa Yritystilat Oy:n Teknologiaapuisto Noheva Oy:ssä Teknologiapuiston EAKR – rahoituksella ja Suur-Savon energiasäätiön apurahan turvin. Haluan kiittää FT Lasse Pulkista ja etenkin TkL Ritva Käyhköä työn ohjaamisesta, sekä SkogD Kari Liukkoa ja Prof. Esa Vakkilaista työn tarkastamisesta ja hyvistä neuvoista. Kiitokset myös kaikille haastatelluille neuvoista ja tiedoista, jotka mahdollistivat työn tekemisen. Lopuksi haluan vielä kiittää äitiäni, joka on tukenut minua koko opiskelu-urani ajan.

Savonlinnassa, 20.1.2011

Jerkko Starck

## Sisällysluettelo

1. JOHDANTO.....	10
1.1 Tausta .....	10
1.2 Tavoitteet.....	11
1.3 Työn rakenne, käytetty aineisto ja menetelmät .....	12
1.4 Työn rajaus ja rajoitukset .....	13
2. BIOMASSAN JALOSTUS PYROLYYSIÖLJYKSI.....	14
2.1 Valmistusprosessi.....	14
2.2 Pyrolyysiöljyn koostumus ja ominaisuudet.....	17
2.2.1 Fysikaaliset ominaisuudet .....	17
2.2.2 Tuhka, rikki ja kiintoaineet .....	20
2.2.3 pH ja korroosio.....	21
2.2.4 Varastointiajan ja –lämpötilan vaikutus pyrolyysiöljyyn.....	22
2.2.5 Stabiiliuden parantaminen.....	23
2.2.6 Ympäristö- ja terveysvaikutukset.....	23
2.3 Käsittely ja kuljettaminen.....	24
2.4 Pyrolyysiöljyn käyttökohteet ja –mahdollisuudet .....	25
2.4.1 Kattilat ja uunit.....	27
2.4.2 Meesauunit .....	28
2.4.3 Dieselmoottorit ja kaasuturbiinit .....	29
2.4.4 Jatkojalostus liikennepolttoaineeksi .....	31
2.4.5 Yhteispoltto .....	32
2.5 Standardisointi ja lainsäädäntö .....	33
3. RAAKA-AINE .....	35
3.1 Raaka-aineen alueellinen saatavuus ja hinta .....	36
3.1.1 Metsäenergian teknillistaloudellinen potentiaali.....	37
3.1.2 Vaneri- ja kertopuuteollisuuden teoreettinen sivuainevirtapotentiaali.....	38
3.1.3 Sahateollisuuden teoreettinen sivuainevirtapotentiaali .....	40
3.1.4 Savonlinnan seudun käytettävissä olevat raaka-aineresurssit .....	41
3.1.5 Yhteenvedo saatavuudesta ja hinnasta .....	43
4. PYROLYYSIÖLJYN ALUEELLISET MARKKINAT .....	45
4.1 Lämpökeskukset ja voimalaitokset.....	46

4.2 Meesauunit .....	47
4.3 Muut .....	49
5. BIOÖLJYN TUOTANTOLAITOKSEN KUVAUS .....	50
5.1 Raaka-aineen vastaanotto .....	51
5.2 Haketin tai murskain .....	51
5.3 Kuivuri .....	53
5.4 Pyrolyysiöljysäiliö .....	54
5.5 Muu tarvittava laitteisto.....	54
6. LAITOKSEN KUSTANNUKSET .....	56
6.1 Investointikustannukset .....	56
6.2 Muuttuvat kustannukset .....	58
7. BIOÖLJYN TUOTANTOLAITOKSEN KANNATTAVUUSTARKASTELU .....	61
7.1 Investoinnin kannattavuuden arviointi .....	61
7.2 Käytetyt alkuarvot ja oletukset.....	62
7.3 Laskenta.....	63
7.3.1 Pyrolyysiöljyn omakustannushinta.....	63
7.3.2 Annuiteettimenetelmä .....	65
7.3.3 Koroton ja korollinen takaisinmaksuaika.....	66
7.4 Tulokset.....	67
7.5 Tukien ja päästökaupan vaikutus.....	68
7.6 Herkkyystarkastelu .....	69
7.6.1 Investointikustannukset .....	70
7.6.2 Raaka-aineen hinta .....	71
7.6.3 Raskaanpolttoöljyn markkinahinta.....	72
7.6.4 Ympäristöpolitiikka ja tukitoimet .....	72
8. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	74
8.1 Yhteenveto.....	74
8.2 Johtopäätökset .....	76
LÄHDELUETTELO .....	78
LIITTEET .....	85
liite1: Bioöljyn tuotantolaitoksen massa- ja energiavirrat .....	85

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\eta$	hyötysuhde	
C	kustannus	[€/MWh]
H	raskaan polttoöljyn markkinahinta	[€/MWh]
I	investointikustannus	[€]
i	korkokanta	[%]
K	kustannus	[€]
k	päästökerroin	[t/TJ]
M	muuntokerroin	[MWh/t]
m	massa	[kg]
N	nettotuotto	[€/a]
n	pitoaika	[a]
q	lämpöarvo	[MJ/kg]
T	vuosituotanto	[t]
t	päiväkapasiteetti	[t]
	miljoonasosa	[ppm]
	paino-osuus	[wt%]

### Alaindeksit:

a	koroton
b	korollinen
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
c	kapasiteetti
h	haketinvaihe

hk	henkilö
k	kuivurivaihe
kk	muut muuttuvat
mahd	mahdolliset
p	pyrolyysiyksikkö
po	pääoma
pa	polttoaine
ra	raaka-aine
rpö	raskas polttoöljy
s	pyrolyysiöljyn varastointi
sä	sähkö
t	tuotanto
v	raaka-aineen vastaanotto
yht	yhteiset

### **Lyhenteet:**

ASTM	Kansainvälinen standardoimisjärjestö
BDMTPD	Täysin kuivaa kuutiotonnia päivässä
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
EMAS	Ympäristöraportti
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö
LVI	Lämpö, vesi, ilma
NREL	Kansallinen uusiutuvan energian laboratorio
PVC	Polyvinyylikloridi

TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
UBC	University of British Columbia
VTT	Valtion teknillinen tutkimuslaitos

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Uusiutuvan energian käytön lisääminen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ohella on yksi merkittävimmistä keinoista ilmastomuutoksen kiihtymisen torjumisessa. Kansainväliset ilmastosopimukset ja EU:n energiadirektiivit ohjaavat yhä enemmän uusiutuvien energiamuotojen käyttöön. Suurin potentiaali on bioenergialla, joka on nopeasti uusiutuvaa ja päästöneutraalia. Bioenergian käytön lisääminen myös parantaa energiaomavaraisuutta ja huoltovarmuutta. Fossiilisten polttoaineiden hintojen nousu ja suuri volatilitiitti sekä uusiutuvien energialähteiden lisääntyneet tukitoimet ja päästökauppa ovat parantaneet kiinteiden ja nestemäisten biopolttoaineiden kilpailukykyä.

Hallituksen pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian (2008) tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian osuus vuoteen 2020 mennessä 38 %:iin komission Suomelle esittämän velvoitteen mukaisesti. Uusiutuvan energian lisäkäytön käynnistämiseksi nykyisiä tuki- ja ohjausjärjestelmiä tehostetaan ja muutetaan. [TEM, Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia, 2008]

Hallituksen budjettiesityksen mukaan polttoaineiden verot kasvavat vuoden 2011 alussa voimakkaasti. Kivihiilen vero nousee nykyisestä arvosta 50,50 €/t arvoon 128,10 €/t. Maakaasun vero nousee arvosta 2,10 €/MWh arvoon 13,72 €/MWh. Nämä korotukset vaikuttavat etenkin kaukolämmön hintaan voimakkaasti, jonka kannattavuus heikkenee polttoaineena maakaasua tai kivihiiltä käytävissä paikoissa. [energianet.fi, 27.8.2010] Oman korotuksensa fossiilisten polttoaineiden hintaan tuo päästöoikeuksien hinnan nousu, joka seurailee fossiilisten polttoaineiden hintoja.

Biomassasta valmistettavista nestemäisistä polttoaineista pyrolyysiöljyä pidetään halvimpana fossiilisten polttoaineiden korvaajana. [Oasmaa et al., 2005, 2162] Erityisen kiinnostavia kohteita ovat kaukolämpölaitokset ja metsäteollisuuden meesauunit, joiden uskotaan olevan pyrolyysinesteiden ensimmäisiä markkina-alueita. [Bradley, 2006, 4] Pyrolyysiöljyn ominaisuudet kuitenkin poikkeavat suuresti fossiilisista polttoöljyistä. Siinä on raskasta polttoöljyä suurempia pitoisuuksia vettä, happea, kiintoaineita ja tuhkaa. Oman haasteensa luo myös pyrolyysiöljyn matala pH-arvo ja fossiilisia öljyjä huomattavasti matalampi lämpöarvo. [Oasmaa et al., 2005, 2163]

Työn taustaorganisaationa toimivat Savonlinnan Yritystilat Oy:n Teknologiapuisto Noheva, Savonlinnan Seudun kuntayhtymä ja Honeywell Oy, joiden intresseissä oli kiinnostus lähteä tekemään selvitys Bioöljyn jalostamislaitoksen toteuttamisen mahdollisuuksista Savonlinnan seudulla sekä selvittää alueen teknologiayritysten osaamisen soveltuvuutta hankkeeseen. Selvitystyö toteutetaan Teknologiapuiston EAKR – avusteisen kehittämishankkeen puitteissa. Lisäksi selvitystyöhön on saatu Suur-Savon energiasäätiöltä apuraha. Bioöljyn jalostuksen tekniikaksi on Envergentin (Honeywell & UOP) pyrolyysiteknologia, koska se on tällä hetkellä ainut toimiva kaupallisesti saatavilla oleva teknologia, joka skaalautuu hyvin eri kokoluokkiin.

## 1.2 Tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on selvittää pyrolyysiöljyn tuotannon liiketoimintamahdollisuudet ja kannattavuus Savonlinnan seudulla sekä kartoittaa potentiaaliset teknologiahyödyt alueen uusiutuviin metsäbioenergia- ja biojalostamoliiketoimintoihin erikoistuneille yrityksille. Työssä käsitellään pyrolyysiöljyn ominaisuuksia ja soveltuvuutta teolliseksi polttoaineeksi sekä sen mahdollisia hyötyjä ja haittoja. Työssä suunnitellaan liiketoimintamalli bioöljyn tuotantolaitokselle Savonlinnan alueella ja arvioidaan tuotantolaitoksen kannattavuutta. Samalla kartoitetaan alueen potentiaalinen kysyntä bioöljylle.

Saaduille tuloksille suoritetaan herkkyysanalyysi, jolla selvitetään merkittävimpien kannattavuuteen vaikuttavien reunaehtojen vaikutuksia tuotannon kannattavuudelle.

### 1.3 Työn rakenne, käytetty aineisto ja menetelmät

Kappale kaksi perustuu kirjallisuudessa esitettyyn tutkimustietoon ja siinä käsitellään pyrolyysiöljyn valmistusta, koostumusta ja ominaisuuksia, jotka poikkeavat huomattavasti fossiilisista polttoaineista. Kappale käsittelee myös pyrolyysiöljyn käsittelyä ja kuljetusta sekä potentiaalisia käyttökohteita ja niihin liittyviä vaatimuksia ja rajauksia. Kappaleen lopussa käsitellään uuden pyrolyysiöljyn standardin sisältöä ja sen merkitystä ja vaikutuksia pyrolyysiöljyn kaupallistamisessa.

Työn kolmannessa kappaleessa perehdytään bioöljyn tuotantolaitoksen tarvitseman raaka-aineen alueelliseen saatavuuteen ja hintaan. Aluksi esitetään viimeisimpiin tutkimuksiin nojautuen Etelä-Savon teoreettinen teknillistaloudellinen metsäenergiapotentiaali, jonka jälkeen käsitellään teoreettisesti puunjalostusteollisuuden potentiaalisten sivuainevirtojen määriä. Lopuksi esitetään tämänhetkinen todellinen raaka-aineen saatavuus ja hinta, jotka perustuvat lähinnä alan ihmisten haastatteluihin.

Kappaleessa neljä kartoitetaan potentiaaliset pyrolyysiöljyn alueelliset markkinat. Tarkoituksena on selvittää kuinka paljon potentiaalisesti korvattavaa raskasta ja kevyttä polttoöljyä työssä rajatulla alueella käytetään. Fossiilisia polttoaineita käyttävät lämpökeskukset ja voimalaitokset on selvitetty tilastollisesti, kun taas meesauunien käyttämien fossiilisten polttoaineiden määrä on selvitetty haastatteleamalla meesauunien käytöstä vastaavia henkilöitä, lähinnä tehtaiden käyttöpäälliköitä. Muut alueelliset käyttökohteet on esitetty lähinnä teoreettisena kuriositeettina.

Työn viidennessä kappaleessa esitetään mistä, ja minkälaisista osakokonaisuuksista bioöljyn tuotantolaitos koostuu ja kuudennessa kappaleessa puolestaan esitetään näille laitoksille investointikustannukset ja käsitellään koko laitoksen käytöstä aiheutuvia kuluja. Kappale seitsemän on työn varsinainen laskentaosio, jossa tarkastellaan bioöljyn tuotantolaitoksen kannattavuutta itsenäisenä ja integroituna laitoksena kahdessa eri kokoluokassa. Samalla tarkastellaan päästökaupan ja tukitoimien vaikutusta bioöljyn tuotannon kannattavuuteen. Työn lopussa kappaleessa kahdeksan esitetään lyhyesti analyysi laitoksen teknologiahyödyistä ja potentiaalista paikallisille yrityksille.

#### **1.4 Työn rajaus ja rajoitukset**

Työssä bioöljyn tuotantolaitoksen liiketoiminnallista kannattavuutta tarkastellaan nimenomaan Savonlinnan seudun lähtökohdista, joten saadut tulokset eivät välttämättä sovellu muualle Suomeen suoraan käytettäväksi; laskennassa on käytetty paikallisia olosuhteita, raaka-aineen saatavuutta ja hintaa. Laittevalmistajilta saaduissa hintatiedoissa on myös investointivaiheelle tyypillisesti laajahko hintahaarukka (mm. pyrolyysiyksikön hinta annettu +/- 40 prosentin tarkkuudella), jolloin todellinen kokonaisinvestointi voi poiketa merkittävästi laskennassa käytetyistä. Laskennassa on myös jouduttu käyttämään paljon oletuksia, jotka voivat vaikuttaa lopputuloksiin.

## 2. BIOMASSAN JALOSTUS PYROLYYSIÖLJYKSI

Pyrolyysiöljy, joka useimmiten tunnetaan bioöljynä, on orgaanisesta bioperäisestä raaka-aineista valmistettua polttoainetta. Se on tummanruskeaa, juoksevaa nestettä, joka valmistetaan aluksi kaasuttamalla biomassaa ja sen jälkeen jäädyttämällä se. Lopputuotteena saatavalla bioöljyllä on monia etuja verrattuna kiinteisiin puupolttoaineisiin tai biomassoihin. Sen teholliseen lämpöarvoon perustuva energiatiheys on huomattavasti suurempi ja kuljetus ja käsittely ovat helpompaa ja kustannustehokkaampaa. [Oasmaa et al., 2005, 2156]

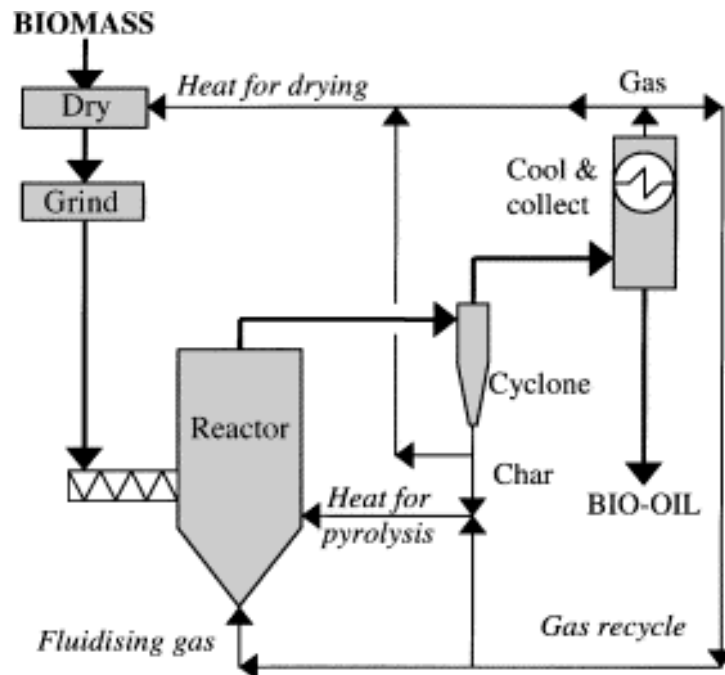
Pyrolyysiprosessit voidaan karkeasti jakaa nopeisiin ja hitaisiin pyrolyyseyihin. Prosessit eroavat toisistaan lämpötilan, viipymääjan ja raaka-aineen kuumentamisnopeuden (K/s) suhteen. [Onay & Kockar, 2003, 2418] Eri prosessit on myös usein optimoitu toimimaan tietyllä raaka-aineella ja partikkelikoolla. Edellä mainituista tekijöistä johtuen pyrolyysiöljyjen koostumukset vaihtelevat huomattavasti.

### 2.1 Valmistusprosessi

Nopea pyrolyysi on korkeassa lämpötilassa (n. 500 °C) tapahtuva prosessi, jossa biomassa kuumennetaan nopeasti hapettomissa olosuhteissa. Kuumennuksen seurauksena biomassa hajoaa ja muodostaa lähinnä höyryä, aerosoleja ja hiiltojäännöstä. Pyrolyysiprosessin keskeiset piirteet ovat: [Bridgwater, 2004, 23]

- Erittäin korkea raaka-aineen kuumennus- ja lämmönsiirtoaste (nopeus), joka vaatii yleensä tarkkaan säädettyä biomassan syöttöä
- Tarkasti kontrolloitu pyrolyysin reaktiolämpötila, n. 500 °C
- Lyhyt kaasujen viipymäaika reaktorissa, tyypillisesti alle 2 sekuntia
- Pyrolyysikaasujen nopea jäädytys pyrolyysiöljyn talteenottamiseksi

Reaktorissa syntynyt kaasu jäädytetään kondensaattorissa, jolloin se tiivistyy nesteeksi. Lopputuotteena muodostuu tummanruskeaa pyrolyysiöljyä, jonka lämpöarvo on noin puolet konventionaalisista polttoöljyistä. [Bridgwater et al., 1999, 1480]. Nopean pyrolyysin leijukerrostekniikan kaaviokuva on esitetty alla kuvassa 1.



**Kuva 1:** Pyrolyysiprosessin (leijukerros) kaaviokuva [Bridgwater et al., 1999, 1480]]

Erilaisia pyrolyysitekniikoita on kehitetty viimevuosikymmeninä useita. Bridgwater et al. (1999) listaavat nämä alla esitettyihin kategorioihin:

- Leijukerros
- Kiertoleiju
- Siirtopeti
- Ablatio (Pyörre- ja pyöriväläpa)
- Pyöriväkartio
- Tyhjiö

Tässä työssä käytetty RTP<sup>TM</sup> (Rapid Thermal Processing) perustuu nopeaan leijukerrosprosessiin, jonka lämmönsiirtoaineena toimii hiekka. RTP-prosessi on valittu käytettäväksi tässä työssä, koska se on modulaarinen ja hyvin

skaalautuva. Lisäksi se on tutkitusti toimiva ja kaupallisesti saatavilla oleva teknologia.

RTP-prosessissa esikäsitelty ja kuivattu biomassa syötetään reaktoriin, jossa se kaasutetaan hapettomissa olosuhteissa. Syntynyt kaasu johdetaan sykloniin, jossa siitä mekaanisesti erotetaan petiaine ja kiintoaine. Syklonista kaasu matkaa kondensaattoriin, jossa se jäähtyy ja lauhtuu pyrolyysiöljyksi. Syklonissa erotettu petimateriaali palaa takaisin reaktoriin. Sivutuotteena saatavat hiili ja palamiskaasu poltetaan, joista saadaan prosessin ylläpitämiseksi tarvittava lämpöenergia. Ylijäämlämpö voidaan käyttää biomassan kuivaukseen.

Prosessin raaka-aineeksi soveltuvat materiaalit ja näiden tyypilliset pyrolyysiöljyn saannot sekä lämpöarvot on esitetty alla taulukossa 1. Raaka-aineen palakooksi suositellaan 3 – 6 mm (vähintään pienimpänä dimensiona) ja kosteuspitoisuudeksi 5 – 6 %.

**Taulukko 1:** Eri raaka-aineiden bioöljysaannot ja lämpöarvot [Envergent Technologies, 15.10.2010]

<b>Syötettävä raaka-aine</b>	<b>Bioöljyn saaton [% kuiva-aineesta]</b>	<b>Ylempi lämpöarvo [MJ/kg]</b>
Lehtipuu	70 - 75	17,2 - 19,1
Havupuu	70 - 80	17,0 - 18,6
Lehtipuun kuori	60 - 65	16,7 - 20,2
Havupuun kuori	55 - 56	16,7 - 19,8
Maissi	56 - 75	17,6 - 20,2
Sokeriruoko	70 - 75	18,9 - 19,1
Jätepaperi	60 - 80	17,0 - 17,2

## 2.2 Pyrolyysiöljyn koostumus ja ominaisuudet

Pyrolyysiöljyn ominaisuudet käsittävät useita muuttuvia tekijöitä. Syötettävä raaka-aine on yksi suuri muuttuja, sillä eri biomassat omaavat toisistaan poikkeavat koostumukset. Jopa saman raaka-aineen mineraalikoostumukset voivat vaihdella. [Ringer et al., 2006, 16] Muita tärkeitä muuttujia ovat reaktorin lämpötila, reaktioaika ja pyrolyysikaasun jäähtytysnopeus. Edellä mainituista tekijöistä johtuen voi bioöljyn koostumus vaihdella huomattavasti.

### 2.2.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Pyrolyysiöljy on poolisten orgaanisten yhdisteiden (75 -80 wt%) ja veden (20 – 25 wt%) sekoitus [Bridgwater et al., 1999, 1480]. Orgaaniset yhdisteet ovat moniosaisia sekoituksia erikokoisista molekyyleistä, jotka ovat syntyneet selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin depolymeroinneista ja pilkkoutumisista. Tämän johdosta pyrolyysiöljyn alkuainekoostumus muistuttaa enemmän biomassan kuin fossiilisen öljyn koostumusta. [Bridgwater, 2004, 26] Pyrolyysiöljyn, kokopuuhakkeen ja raskaan sekä kevyen polttoöljyn fysikaalisia ominaisuuksia on vertailtu alla taulukossa 2.

**Taulukko 2:** Polttoaineiden fysikaalisia ominaisuuksia

Ominaisuus:	Kokopuuhake <sup>1</sup>	Bioöljy <sup>2</sup>	Kevyt polttoöljy <sup>1</sup>	Raskas polttoöljy POR 180 <sup>3</sup>	Raskas polttoöljy POR 420 <sup>4</sup>
Tehollinen lämpöarvo kuiva- aineessa [MJ/kg]	18,5 - 20	13 - 20	42,4 - 42,9 MJ/l	41,0	40,9
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]	7 - 10	-	42,4 - 42,9	-	-
Kosteus [wt %]	50 - 60	20 - 30	<0,1	0,1	0,1
pH		2,5	-	-	-
(rho)/Tiheys [t/m <sup>3</sup> ]	0,25 - 0,35	1,1 - 1,3	0,87	0,99	1,0
Viskositeetti [cSt]		15 - 35 (40 °C)	5,8 (20 °C)	165 (50 °C)	320 (50 °C)
Alkuainekoostumus: [wt%]					
C	48 - 52	32 - 48	86,2	88,5*	87,6
H	5,4 - 6,0	7 - 8,5	13,7	10,1*	10,5*
O	42,5*	44 - 60	0	-	-
N	0,3-0,5	<0,4	<0,1	0,5	0,4
S	<0,1	<0,05	0,1	1,0	0,95
Tuhkapitoisuus [wt%]	1 - 2	<0,2	0,01	0,02	0,03

1) Lähde: [Alakangas, 2000]

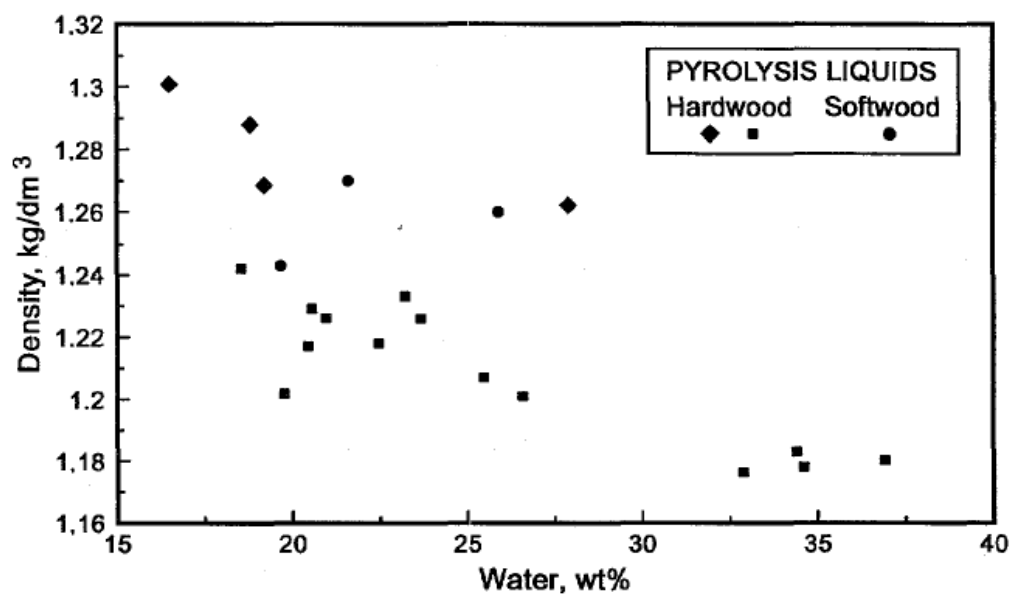
2) Lähde: [Chiaromonti et al., 2005]

3) Lähde: [Teboil, 2009/2]

4) Lähde: [Neste Oil, 2010]

\*Arvio

Kuten taulukosta 2 voidaan huomata, on pyrolyysiöljyn lämpöarvo noin kaksinkertainen (kosteaan) metsähakkeeseen verrattuna ja noin puolet fossiilisista polttoöljyistä, johtuen pyrolyysiöljyn korkeasta happipitoisuudesta. Toisaalta pyrolyysiöljyn tiheys (noin  $1,2 \text{ kg/dm}^3$ ) on suurempi, jolloin tilavuudellisesti (MJ/l) sen lämpöarvo on noin 60 % vastaavista fossiilisista polttoaineista. Vesipitoisuuden vaikutus pyrolyysiöljyn tiheyteen on esitetty kuvassa 2.



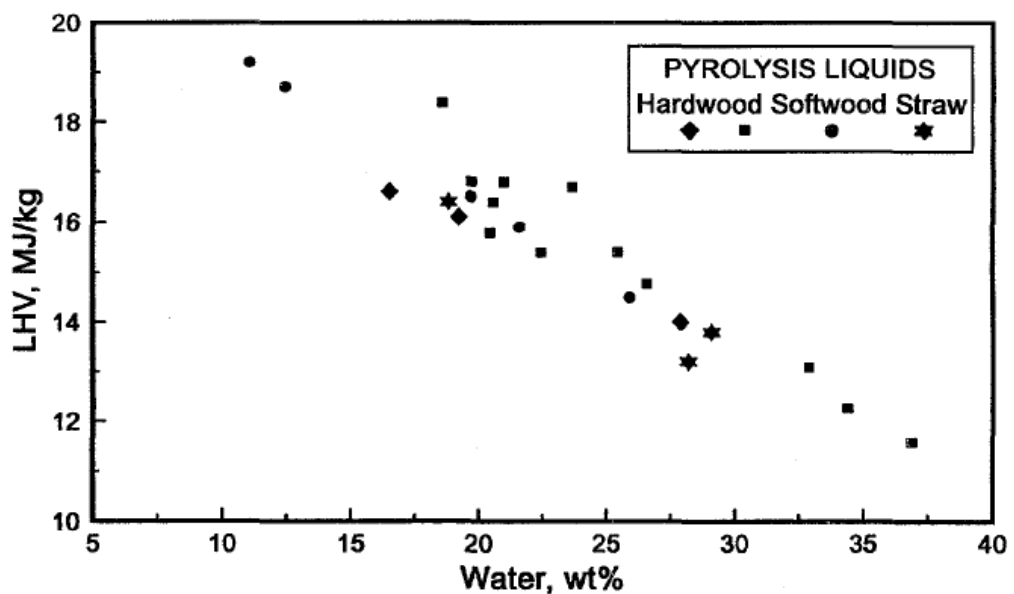
**Kuva 2:** Puuperäisten pyrolyysiöljyjen tiheys vesipitoisuuden funktiona [Oasmaa et al., 1997, 22]

Bioöljyn vesi on peräisin syötettävän raaka-aineen alkuperäisestä kosteudesta ja pyrolyysissä tapahtuvista reaktioista. Edellä mainituista syistä johtuen pyrolyysiöljyn vesipitoisuus vaihtelee reilusti (15 – 35 %). Lopputuotteen vedellä on sekä negatiivisia, että positiivisia vaikutuksia. Se alentaa lämpöarvoa, liekin lämpötilaa ja pidentää syttymisaikaa. Toisaalta se alentaa bioöljyn viskositeettia, tasoittaa lämpötilaprofiilia poltettaessa ja alentaa  $\text{NO}_x$ -päästöjä. [Bridgwater, 2004, 28]

Bioöljyssä on happea tyypillisesti noin 45 – 50 wt% [Bridgwater, 2004, 27]. Happi on mukana lähes kaikissa bioöljyn orgaanisissa yhdisteissä, joka on suurin ero bioöljyn ja fossiilisten polttoöljyjen koostumuksessa. Korkea

happipitoisuus aiheuttaa pyrolyysiöljyn alhaisen lämpöarvon verrattuna fossiilisiin polttoöljyihin, sekä lisää sen syövyttävyyttä ja epästabiiliutta. Happipitoisuus voi vaihdella huomattavasti biomassan vesipitoisuuden mukaan. [Lu et al., 2009,1377]

Pyrolyysiöljyn palamisominaisuudet ovat tärkeitä käytännön sovellusten kannalta. Se vaatii suuren määrän energiaa syttyäkseen, mutta syttyttyään palaa tasaisesti [Lu et al., 2009, 1381]. Bioöljyn tehollinen lämpöarvo riippuu käytetystä biomassasta ja käytetystä teknologiasta ja vaihtelee välillä 15 – 20 MJ/kg. Kuvassa 3 alla on esitetty bioöljyn vesipitoisuuden vaikutus lämpöarvoon.



**Kuva 3:** Bioöljyn tehollinen lämpöarvo vesipitoisuuden funktiona [Oasmaa et al., 1997]

Liekin adiabaattinen lämpötila on suhteellisen korkea, 1700 – 2000 K. Normaaleilla polttoöljyillä lämpötila on 2200 – 2300 K. Ero on paljon pienempi, kuin bioöljyn alhaisen lämpöarvon johdosta voisi olettaa. Pieni ero johtuu tavallisia polttoöljyjä huomattavasti pienemmästä stökiometrisestä ilmantarvekertoimesta. [Bridgwater, 2004, 29] Useissa eri tulitunneleissa suoritetuissa testeissä [mm. Shihadeh et al., 1994, Huffman et al., 1996, van de Kamp et al., 1993] on osoitettu, ettei puuperäisen bioöljyn ja fossiilisen

polttoöljyn (No. 2) palamiskäyttäytymisissä ollut olennaisia eroja. Bioöljyn  $\text{NO}_x$ -, CO- ja hiukkaspäästöt olivat kuitenkin korkeammat.

### 2.2.2 Tuhka, rikki ja kiintoaineet

Pyrolyysiprosessissa suurin osa epäorgaanisista yhdisteistä (tuhkasta) kerääntyy hiilipartikkeleihin. Tästä johtuen hiilipartikkeleiden tuhkasisältö on 3 – 8 kertaa suurempi kuin biomassassa. Tuhkan metallien uskotaan aiheuttavan huomattavaa korkealämpötilakorroosiota ja pinnoille sakkautumista. [Lu et al., 2009, 1378] Qi et al. (2006) raportoi tuhkan läsnäolon aiheuttavan eroosiota, korroosiota ja koksautumista moottoreissa sekä venttiileissä ja jopa mekaanista kulumista tuhkapitoisuuden ollessa yli 0,1 wt%. Tarkemmin eritellen tuhkan alkalit natrium, kalium sekä vanadiini aiheuttavat korroosiota ja karstaa korkeassa lämpötilassa. Kalsium aiheuttaa puolestaan kovia kerrostumia. VTT:n ja NREL:n tutkimuksista kuitenkin käy ilmi, että pyrolyysikaasujen suodatuksella saavutetaan alle 0,01 wt% tuhkapitoisuus ja 10 ppm alkalipitoisuus. [Lu et al., 2009, 1378]

Puuperäisten pyrolyysiöljyjen rikkipitoisuus on hyvin alhainen (60 – 500 ppm). [Oasmaa et al., 1997, 19] Valtioneuvoston asetuksessa 689/2006 3 ja 4 §:ssa määritetään, että Suomessa käytettävässä raskaassa polttoöljyssä saa olla rikkiä enintään 1,0 wt% (10 000 ppm) ja kevyessä polttoöljyssä enintään 0,1 wt% (1 000 ppm). Poikkeuksena kuitenkin ovat raskasta polttoöljyä käyttävät vähintään 50 MW:n laitokset ja polttolaitokset, joiden rikkidioksidipäästöt ovat enintään  $1700 \text{ mg/m}^3$  happipitoisuuden ollessa 3 vol-%. [Finlex]

Bioöljyt sisältävät enemmän tai vähemmän kiintoaineita biomassasta ja käytettävästä prosessista riippuen. Kiintoaineet koostuvat lähinnä hiilipartikkeleista ja muista materiaaleista, kuten leijukerroksen hiekasta. [Lu et al., 2009, 1378] Kiintoaineet erotetaan yleensä syklonilla, mutta ne ovat tehokkaita erottamaan ainoastaan isompia partikkeleita ( $>10 \mu\text{m}$ ). Useat pienet partikkelit, jotka menevät erotuksen läpi, kondensoituvat pyrolyysikaasujen

kanssa bioöljyksi. Kiintoainepitoisuus pyrolyysiöljyssä voi nousta jopa 3 wt%:iin. [Lu et al., 2009, 1378]

Kiintoainepartikkelit tuovat mukanaan monia negatiivisia vaikutuksia bioöljyjen varastointiin ja polttoon. [Oasmaa & Czernik, 1999, 14-21] Ensimmäkin hiilipartikkeleilla on taipumus hitaasti kasautua säiliön pohjalle. Toiseksi kiintoaineet kasvattavat viskositeettia, mikä hankaloittaa pyrolyysiöljyn pumppausta ja sumutusta. Kolmanneksi kiintoaineet aiheuttavat eroosiota ja tukoksia polttoaineen injektiojärjestelmiin. Neljänneksi hiilipartikkelit toimivat katalyytteina ja kiihdyttävät bioöljyn ikääntymistä. Viidenneksi hiilipartikkelit edistävät hitaasti palavien hiilipitoisten ”palojen”, ja näin ollen palamattomien partikkeleiden muodostumista palamiskaasussa. [Lu et al., 2009, 1378]

### 2.2.3 pH ja korroosio

Suuren haihtuvien happojen määrän (8 – 10 wt%) takia, lähinnä etikka- ja muurahaishappo, pyrolyysiöljyjen pH on matala (2 – 3). Nämä hapot yhdessä veden kanssa ovat suurin syy niiden syövyttävyyteen korkeissa lämpötiloissa. [Oasmaa et al., 1997, 30] Bioöljyjen on raportoitu olevan hyvin syövyttävää alumiinille, niukkahiiliselle teräkselle ja nikkelipohjaisille materiaaleille. Korroosiokerroin kasvaa lämpötilan noustessa ja bioöljyn vesipitoisuuden lisääntyessä. [Lu et al., 2009,1381]

Useat muovit, kuten PTFE (polytetrafluorieteeni), PP (polypropeeni) ja HDPE (suuritiheksinen polypropeeni), ovat hyvin resistenttejä pyrolyysiöljyille. Ne ovat erinomaisia materiaaleja säiliöihin varastoinnissa, kuljetuksessa ja bioöljyjen näytteenottoissa. Hiiliteräksistä yleinen AISI 01 syöpyi selvästi standardinmukaisessa korroosiotestissä 60 °C lämpötilassa. Haponkestävä AISI 316 on resistentti ainakin alle 50 °C lämpötiloissa. [Oasmaa et al., 1997, 30]

Pyrolyysiöljyn alhainen pH aiheuttaa lisävaatimuksia polttojärjestelmässä käytettäville materiaaleille, samoin kuin sellutehtailla käytettävä mäntyöljy.

Kaikki pyrolyysiöljyn kanssa kosketuksessa olevat osat on valmistettava haponkestävästä materiaalista. Näitä osia on sekä polttimessa itsessään että öljyn pumppausjärjestelmässä, jossa öljypumppu on tärkeässä roolissa. Käytetyistä materiaaleista johtuen pyrolyysiöljyn polttojärjestelmän hinta nousee korkeammaksi kuin perinteisen öljyn polttojärjestelmän. [Saario, 20.9.2010]

#### 2.2.4 Varastointiajan ja –lämpötilan vaikutus pyrolyysiöljyyn

Suurin osa fysikaaliskemiallisista muutoksista pyrolyysiöljyssä tapahtuu ensimmäisen kuuden kuukauden aikana. Korkean moolimassan omaavan ligniinijohdannaisien materiaalien määrä kasvaa ja eetteriin liukenevien ja liukenemattomien ainesosien määrä vähenee. Tästä seuraa pyrolyysiöljyn keskimääräisen molekyyli­massan ja viskositeetin kasvu. Haihtuvien aldehydien ja ketonien määrän väheneminen nostaa leimahduspistettä ja viskositeetin kasvu nostaa jähmepistettä. Vettä muodostuu sivutuotteena pyrolyysiöljyyn lisää erilaisten kondensaatioreaktioiden seurauksena, mikä laskee pyrolyysiöljyn lämpöarvoa. [Oasmaa & Kuoppala, 2003, 1075-1084]

VTT:n suorittamissa kokeissa pyrolyysiöljyä varastoitiin 9 °C lämpötilassa. Muutaman kuukauden jälkeen tuotteeseen muodostui kaksi kerrosta, jotka olivat vielä sekoitettavissa toisiinsa. Puolentoista vuoden varastoinnin jälkeen ja vesipitoisuuden noustua lähes 30 wt%:iin, neste oli jakautunut pohjalle erottuneeseen korkea viskositeettiseen ”liejuun” ja nestemäiseen vesiliukoiseen yläkerrostumaan, jotka kuitenkin olivat vielä sekoitettavissa toisiinsa. Kahden vuoden jälkeen kerroksia ei enää voinut sekoittaa toisiinsa huoneen lämpötilassa. [Oasmaa & Kuoppala, 2003, 1079]

Pyrolyysiöljyn varastointilämpötilan raja-arvot voidaan viitteellisesti määrittää sen jähmepisteestä, joka on matalin lämpötila jossa öljy vielä virtaa kohtuullisesti, ja leimahdus­lämpötilasta, joka on korkein lämpötila jossa öljyä voidaan varastoida ja käsitellä ilman vakavaa tulipalovaaraa. Edellä mainitut

lämpötilat on annettu standardin kappaleessa 2.5. Standardin liitteessä ”X2. Long-Term Storage of Pyrolysis Liquid” annetaan minimivarastointilämpötilaksi 10 °C, jotta saavutetaan riittävä juoksevuus, ja maksimiksi 30 °C, jota korkeammat lämpötilat kiihdyttävät pyrolyysiöljyn laadun heikkenemistä. Suositeltu varastointilämpötila on 15 – 20 °C. [ASTM D7544 -09]

### 2.2.5 Stabiiliuden parantaminen

Lisäaineiden lisäämisellä pyrolyysiöljyyn on todettu olevan merkittäviä vaikutuksia stabiliteettiin ja viskositeettiin. Diebold ja Czernik (1997) tutkivat useiden eri lisäaineiden lisäämistä pyrolyysiöljyyn, jotka kaikki osoittivat radikaalisti alentavan sen ikääntymisnopeutta (viskositeetin kasvunopeutta). Lisäaineet alensivat alkuperäistä viskositeettia (40 °C lämpötilassa) puolella ja hidastivat kuumakaasusuodatetun pyrolyysiöljyn ikääntymisnopeutta 7 - 18 kertaisesti. Parhaaksi lisäaineeksi osoittautui metanoli noin 10 wt% lisäyksellä pyrolyysiöljyyn. Metanolin lisääminen samalla nosti pyrolyysiöljyn lämpöarvoa. [Diebold & Czernik, 1997, 1081-1091]

### 2.2.6 Ympäristö- ja terveysvaikutukset

Useissa tutkimuksissa on todettu pyrolyysiöljyn olevan biologisesti hajoavaa. [mm. Blin et al., 2007, 2680] Lisäksi on todettu biohajoamiskerrointen ja – mallien olevan yhdenmukaisia, mutta huomattavasti korkeampia kuin dieselöljyllä. Testit osoittavat bioöljyjen hajoavan hyvin nopeasti ensimmäisen kahdeksan päivän aikana. [Qiang, 2009,1382]

Ympäristön kannalta pyrolyysiöljyn kuljetuksella on etu fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Esimerkiksi bioöljyä kuljettavan tankkerilaivan upotessa tai vuotaessa pyrolyysiöljy ei leviä fossiilisen öljyn tapaan vaan eriytyy hyvin painaviin orgaanisiin osioihin ja uppoaa ollen suurimmalta osalta

reagoimatonta. Vesiosa pyrolyysiöljystä laimenee ja on erittäin biohajoavaa. [Bradley,2006, 7]

Bioöljyjen myrkyllisyys on niiden koostumuksen funktio, joka riippuu prosessiolosuhteista, käytetystä biomassasta ja mahdollisesti bioöljyn iästä. [Diebold, 1997, 26] Bioöljyjen on raportoitu voivan aiheuttaa suorassa kontaktissa vakavia silmävammoja ja suuria pitoisuuksia sisään hengitettäessä keuhkovaurioita. Myrkyllisyys iholle ei ollut merkittävä. [Lu et al, 1382] Laajemmin aiheesta on raportoinut mm. Diebold (1997) teoksessa “A Review of the Toxicity of Biomass Pyrolysis Liquids Formed at Low Temperatures”.

### 2.3 Käsittely ja kuljettaminen

Pyrolyysiöljyä voidaan varastoida, pumpata ja kuljettaa kuten mineraaliöljyjä. Kuitenkin sen happamuuden ja syövyttävyyden takia kuljetus ja varastointi vaatii pieniä muutoksia. Varastosäiliöiden ja putkiston tulee olla ruostumatonta terästä (304), PVC:tä, teflonia tai vastaavaa materiaalia. Pyrolyysiöljyn kerrostuminen ei ole ongelma lyhyen aikavälin varastoinnissa tai kuljetuksessa, eikä rekoilta, junilta tai laivoilta vaadita sekoitusvalmiutta. Varastointisäiliöissä sekoitus järjestyy helposti olemassa olevilla laitteilla. [Bradley, 2006, 6-7]

Teoriassa bioöljyä voidaan kuljettaa säiliöautoilla, laivoilla ja junilla. Käytännössä ja Suomen mittakaavassa tämä kuitenkin tarkoittaa lähinnä maantiekuljetuksia kemikaalirekoilla, jotka soveltuvat hyvin happamien nesteiden kuljetukseen.

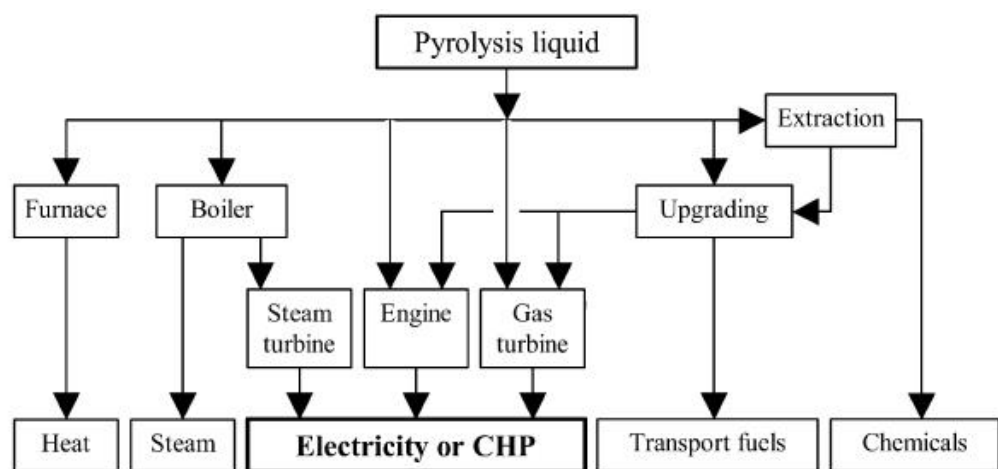
Pyrolyysinesteitä ei ole luokiteltu YK:n tai EU:n säädöksissä, joten niille on määriteltävä oma luokittelu. Kirjallisuudessa esitettyjen tyyppillisten fysikaalisten ominaisuuksiensa perusteella se on luokiteltu palavaksi nesteeksi (luokka 3), mutta siinä voi olla komponentteja, jotka kuuluvat luokkaan 6 (myrkylliset aineet) tai luokkaan 8 (syövyttävät aineet). Pyrolyysinesteitä ei tule kuljettaa

muiden vaarallisten aineiden kanssa. [Conversion and Resource Evaluation, 2006, 12-15]

Pootakham & Kumar (2010) ovat tutkineen bioöljyn kuljettamista putkilinjaa pitkin. Tutkimuksesta käy ilmi bioöljyn putkikuljetuksen olevan kannattavaa verrattuna säiliöautokuljetukseen putkilinjakapasiteettien ollessa yli 1000 ja 1700 m<sup>3</sup>/d (verratessa 30 ja 60 m<sup>3</sup> säiliöautoihin). Kuljetusetäisyyden ollessa yli 100 km bioöljyä täytyy myös lämmittää pumppausasemilla, jotta viskositeetti saataisiin pidettyä kohtuullisena [Pootakham & Kumar, 2010, 7137-7143]

## 2.4 Pyrolyysiöljyn käyttökohteet ja –mahdollisuudet

Pyrolyysiöljy soveltuu useaan eri sovelluskohteeseen, kuten CHP (Combined Heat and Power) –laitosten polttoaineeksi tai edelleen jalostettavaksi erilaisiksi kemikaaleiksi. Pyrolyysiöljyn käyttöä fossiilisten polttoaineiden korvikkeena sähkön ja lämmön tuotannossa on demonstroitu useissa eri tutkimuksissa, mutta sitä ei toistaiseksi ole otettu kaupallisesti käyttöön suuressa mittakaavassa lähinnä fossiilisia polttoaineita kalliimman hinnan takia. [Ringer et al., 2006, 23] Alla on esitetty kuvassa 4 pyrolyysiöljyn potentiaaliset käyttökohteet.



**Kuva 4:** Pyrolyysiöljyn käyttökohteet [Bridgwater et al., 2002, 187]

Pyrolyysiöljyt ovat hyvin erilaisia verrattuna konventionaalisiin polttoaineisiin, mutta nämä palavat kuitenkin moottoreissa hyvin. Syttyminen on hankalaa, mutta tämä on ratkaistavissa apupolttoaineen käytöllä sytytyksessä. [Bridgwater et al., 2002, 188] Pyrolyysiöljyn polttamisessa on esiintynyt tiettyjä ongelmia ja haasteita, jotka on esitetty alla taulukossa 3.

**Taulukko 3:** Pyrolyysiöljyn käytön ongelmat ja haasteet [Oasmaa et al., 2005, 2162]

Ominaisuus	Tavoiteltava arvo	Nykyinen arvo tämänhetkisellä tekniikalla	Ongelma	Mahdolliset ratkaisut
Vaihtelevuus	max 10 %	>50 %	Muutokset syöttö- ja prosessiparametreissa	Laadunhallintajärjestelmä
Vesipitoisuus	<27 wt%	18 - 40 wt%	Epähomogeenisuus, kerrostuminen	Raaka-aineen kuivaus
Kiintoainepitoisuus <sup>(1)</sup>	<0,01 wt%	<0,6 wt%	Injektorien voitelu, lisääntyvä nesteen epästabiilius, korkeat CO-päästöt	Syöttömateriaalin homogeeninen partikkelikoko, kuumasuodatus, kolme sykklonia reaktorin ulostulossa, nesteen suodatus/sentrifugointi
Epäorgaaniset aineet <sup>(2)</sup>	<0,01 wt%	<0,1 wt%		Raaka-aineen valinta, kuumasuodatus, kolme sykklonia reaktorin ulostulossa, nesteen suodatus/sentrifugointi
Homogeenisuus	Yksi kerrostuma	Vaihtelevuutta	Epätasainen nesteen laatu	Raaka-aineen kosteus <12 wt%, öljyn vesipitoisuus <27 wt%
Stabiilius	max 100% viskositeetin nousu ikääntymistestissä	50 - 150 %	Muutokset nesteen ominaisuuksissa varastoinnin ja käytön aikana	Alkoholin lisäys (metanoli)
Leimahduspiste	Maakohtainen	>40 oC	Kuljetukset turvallisuussäädökset	Nesteen lauhtumislämpötilan säätäminen
pH	<sup>(3)</sup>		Polttoainelinjojen syöpyminen	Kaikkien putkien, säiliöiden ja tiivisteiden tulee olla haponkestäviä
Tehollinen lämpöarvo	<sup>(3)</sup>	16 - 19 MJ/kg	50% matalampi kuin polttoöljyllä, käynnistysvaikeudet	Pumppauspaineen nosto injektoreille, polttoainelinjojen halkaisijoiden kasvattaminen, yhteispoltto, polttokammion muutokset
Viskositeetti	<sup>(3)</sup>	> 50 cSt (20 oC)	Liiansuuri useimmille injektoreille	Nesteen esilämmitys, tukiliuottimen (alkoholi) lisäys, hajottamisaineiden käyttö
Voitelevuus	<sup>(3)</sup>	Ei määritetty	Lakan kasaantuminen injektioneulaan ja polttoainepumpun mäntään	Voitelevuuden/virtausominaisuuksien parantaminen, lisäaineet

- 1) Sisältää hiilen, tuhkan ja hiekan
- 2) Sisältää tuhkan ja hiekan
- 3) Ei määritetty

### 2.4.1 Kattilat ja uunit

Kattilat ja uunit ovat yleensä tehottomampia verrattuna moottoreihin ja turbiineihin, mutta ne toimivat hyvin laajalla valikoimalla eri polttoaineita. Ne soveltuvat hyvin pyrolyysiöljyn käyttöön, kunhan öljyn ominaisuudet ovat tarpeeksi vakaat, päästöt ovat hyväksyttävällä tasolla ja se on taloudellisesti käyttökelpoista. [Bridgwater, 2004, 32]

Pyrolyysinesteiden kattilapoltoissa on esiintynyt erilaisia haasteita, joita on esitetty taulukossa 3. Osa näistä voidaan ratkaista parantamalla pyrolyysiöljyn laatua, toiset vaativat modifikaatioita itse laitteistoihin. Edellä esitetyistä syistä johtuen pyrolyysiöljyn kattilapolto vaatii täytettäväksi tietyt minimireunaehdot: [Oasmaa et al.,2005, 2155-2163]

- Pyrolyysinesteen esilämmitys 70 – 80 °C asteeseen
- Viskositeetin alentaminen 2 – 4 cSt:een (2 – 4 mm<sup>2</sup>/s)
- Ei esilämmitetyn pyrolyysiöljyn takaisinkierätyks varastointisäiliöön
- Käynnistys ja sammutus konventionaalisilla polttoaineilla, jotta vältetään suuttimien tukkeutuminen
- Kiintoainepitoisuus alle 0,1 wt%

Yhdysvalloissa, Wisconsinissa, Red Arrow Productsin laitoksella on tuotettu pyrolyysiöljystä lämpöä kaupallisesti yli 10 vuotta. 5 MW pyörrepoltin käyttää erilaisia polttoaineen sivutuotteiden sekoituksia. Pyrolyysiöljy syötetään polttimeen ruostumattomasta teräksestä valmistetun suuttimen kautta ja sumutetaan ilman kanssa. Hiili ja kaasu syötetään kattilaan eri linjoja pitkin. [Bradley, 2006, 47]

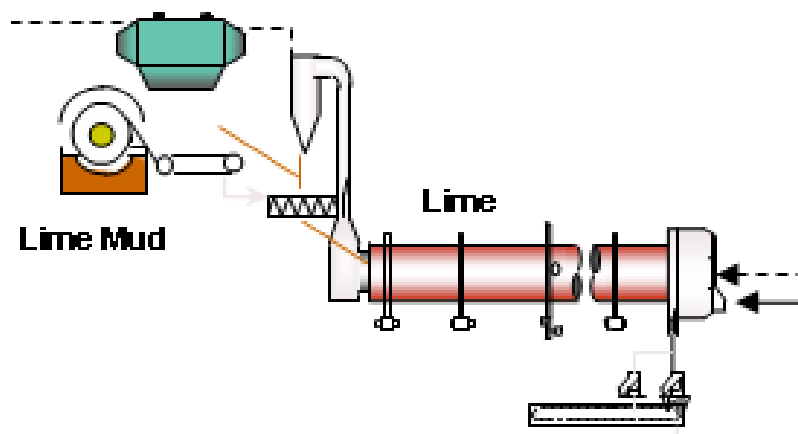
Suurin osa bioöljyn kattilapolttotutkimuksesta on suoritettu Suomessa Neste Oy:n, VTT:n ja Oilon Oy:n toimesta. Suoritettujen testien tärkeimmät havainnot voidaan listata seuraavasti: [Bridgwater, 2004, 33]

- Kattilaosioon ja polttimeen tarvitaan joitakin muutoksia, jotta saavutetaan parempi palaminen

- Bioöljyn liekki oli pidempi kuin polttoöljyn
- Tukipolttoainetta tarvittiin käynnistyksessä, ja matalampilaatuisten bioöljyjen poltossa myös itse polton aikana
- Eri bioöljyjen välillä oli huomattavia eroja palamiskäyttäytymisessä (Korkean viskositeetin, vesi- ja kiintoainepitoisuuden omaavat bioöljyt olivat selvästi heikompilaatuisia)
- Yleisellä tasolla päästöt olivat matalammat kuin poltettaessa raskasta polttoöljyä (paitsi hiukkaspäästöt), ja olivat vahvasti sidoksissa bioöljyn esikäsittelyyn ja laatuun.

#### 2.4.2 Meesauunit

Meesauunit liittyvät kiinteästi sulfaattisellun tuotannon kemikaalien talteenottoprosesseihin. Meesauuni on polttouuni, jolla meesasta ( $\text{CaCO}_3$ ) valmistetaan kalkkia ( $\text{CaO}$ ). Uunissa meesan lämpötila nostetaan niin korkeaksi, että se muuttuu kemiallisesti kalkiksi. Meesauunin toiminta on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5:** Yleiskuva meesauunin toiminnasta [Gullichsen et al., 2000, 10]

Meesauunimarkkinat ovat ideaaliset pyrolyysiöljylle, sillä  $\text{CO}_2$  -neutraalia pyrolyysiöljyä voidaan käyttää meesauunissa tekemällä vain hyvin pieniä muutoksia polttojärjestelmiin raskasta polttoöljyä ja maakaasua korvattaessa. Mäntyöljyä korvattaessa modifikaatioita ei tarvita. [Bradley, 2006, 45]

Dynamotiven tuottamaa pyrolyysiöljyä meesauunissa on testattu UBC:ssa (University of British Columbia) vuonna 2003, jossa poltettiin kaksi tonnia bioöljyä 150 l/h virtauksella. Testauksen kohteena oli kaksi eri puuperäistä pyrolyysiöljyä; kuusi ja kuusi-kuori-sekoitus, joita verrattiin maakaasun polttoon. Kalsinoinnin ja reaktiivisuuden havaittiin olevan hyvin samanlaisia kuin maakaasua poltettaessa. Polttotesti osoitti pyrolyysiöljyn olevan toimiva vaihtoehto maakaasulle, sillä se sumuuntui ja paloi hyvin samankaltaisella liekillä. Myöhemmin Dynamotive testasi pyrolyysiöljyä kaupallisessa laitoksessa, jossa sitä poltettiin yli 20 tonnia 2 t/h virtauksella käyttäen olemassa olevia laitteistoja ja ilman mekaanisia modifikaatioita. Testattu pyrolyysiöljy täytti kaikki laitoksen omistavan yrityksen testiparametrit, kuten uunin tasaisen lämpötilan, kalkin saannon ja polttoaineen stabiilin palamisen. [Bradley, 2006, 45]

#### 2.4.3 Dieselmoottorit ja kaasuturbiinit

Keski- ja hidasnopeuksiset dieselmoottorit toimivat heikompilaatuisillakin polttoaineilla. Bioöljyllä on potentiaalia korvata fossiilisia dieselpolttoaineita dieselmoottoreissa tekemällä pieniä muutoksia koneeseen. Kohdatut vaikeudet kulumisen ja korroosion kanssa vaikuttavat olevan ratkaistavissa tarkalla avainkomponenttien materiaalivalinnoilla ja parannetulla partikkelien poistolla bioöljystä. [Ringer, 2006, 23-24]

Pyrolyysiöljyn käyttöä dieselkoneissa on tutkittu runsaasti 1990-luvulta asti (mm. VTT). Chiaramonti et al. (2005, 1072) on listannut tutkimusten tulokset seuraavasti:

- Pyrolyysinesteiden laatua tarvitsee parantaa: ei kiintoaineita, paremmat voiteluominaisuudet, parempi terminen stabiliteetti
- Koneen vakiomateriaaleista ainakin suutin, neulat ja paineventtiilit tulee vaihtaa. Pumppujen tiivisteiden tulee kestää matalaa pH:ta
- Ei polttoaineen suoraa lämmitystä

- Nopea esilämmitys <90 °C (mieluummin <50 °C)
- Nesteen kierrätystä rajoitettava, jotta estetään polttoaineen laadun heikkeneminen
- Vesisisältö ja terminen krakkaus ovat vastuussa syttymisviiveestä
- Polttoaineen syöttöjärjestelmä pitää suunnitella uudestaan bioöljyn korkean tiheyden ja matalan lämpöarvon takia
- Pyrolyysiöljyn emulgointi parantaa polttoaineen ominaisuuksia ja käytettävyyttä

Suurin osa pyrolyysiöljyn turbiinitutkimuksesta on toteutettu Kanadassa ja Yhdysvalloissa. Mm. Dynamotiven ja Ensynin pyrolyysiöljyä testattiin kaasuturbiinissa vuonna 2004. Turbiini suoriutui testissä erittäin hyvin molempien polttoaineiden kanssa eri kuormituksilla. Polttoaineenkäsittelyjärjestelmä, joka on suunniteltu esilämmittämään polttoaine 90 °C asteeseen, suoriutui hyvin sekä bioöljyn, että kevyen polttoöljyn kanssa. [Oasmaa et al., 2005, 2161]

Orenda Aerospace Corporation on esittänyt alustavat vaatimukset pyrolyysiöljyn käytölle kaasuturbiinissa. Esitetyt vaatimukset ovat partikkelikoko <10 µm ja kiintoainepitoisuus <0,1 wt%. [Oasmaa et al., 2005, 2162] Ringer et al. (2006, 24) huomauttavat partikkeleiden ja alkalimetallien sisällön vaikutuksesta poltossa, mikä on erityisen tärkeää huomioida, mikäli polttoaineessa on rikkiä. Alkalimetallit muodostavat rikin kanssa alkalisulfaattia palamisprosessin aikana, jotka liimautuvat ja voimakkaasti syövyttävät turbiinilapoja. Chiaramonti et al. (2005, 1078) esittää bioöljyn turbiinitutkimuksen tulokset seuraavasti:

- Pyrolyysiöljyä on mahdollista käyttää kaasuturbiineissa. Useita eri pyrolyysiöljyjä on testattu, useilla eri teknologioilla ja biomassoilla valmistettuna
- Polttoaineen esilämmitys (70 – 90 °C) on tarpeen, jotta viskositeettia saadaan alennettua (<10 cSt eli <10 mm<sup>2</sup>/s)
- Pyrolyysiöljyn suodatus on tarpeellinen, jotta tuhka- ja kiintoainepitoisuus saadaan pienemmäksi (raportoitu 10 – 60 µm suodatusta)

- Tarvitaan materiaaleja, jotka ovat resistentteja happamuudelle (esim. austeniittinen 300-sarjan ruostumaton teräs)
- Turbiinin polttokammiota tulee modifioida vastaamaan pyrolyysiöljyn ominaisuuksia
- Modifioitujen suuttimien tulee toimia matalamman lämpöarvon ja korkeamman viskositeetin kanssa. Vakiosuuttimet johtavat huomattaviin tehonalennuksiin
- Laitos tulee käynnistää ja sammuttaa käyttämällä fossiilisia polttoaineita.
- Kuumakaasukomponenteissa on havaittu jonkin verran tuhkan kerrostumista
- Joissakin kokeissa pyrolyysiöljytipat olivat tuplasti kookkaampia dieseltippoihin verrattuna
- Modifioidun kaasuturbiinin päästöjä on seurattu seuraavin tuloksin: CO-, NO<sub>x</sub>- ja SO<sub>2</sub>- tasot olivat sallituissa rajoissa (Ontariossa)
- Modifioitu Orendan kaasuturbiini suoriutui erittäin hyvin alasajon, polttoaineenvaihdon, kuormitusolosuhteiden ja eri polttoaineisiin mukautumisen kanssa
- Tarvitaan pidempiaikaista testausta, jotta saadaan arvioitua ja tunnistettua korroosion ja karstaantumisen vaikutukset

#### 2.4.4 Jatkojalostus liikennepolttoaineeksi

Bioöljyn polttoainelaatuun negatiivisesti vaikuttavat ominaisuudet ovat ennen kaikkea matala lämpöarvo, yhteensopimattomuus konventionaalisten polttoaineiden kanssa, kiintoainepitoisuus, korkea viskositeetti, epätäydellinen haihtuvuus ja kemiallinen epästabilius. Osaa näistä voidaan parantaa suhteellisen yksinkertaisin fysikaalisin ratkaisuin, kun taas toiset vaativat monimutkaisempaa kemiallista prosessointia. [Bridgwater, 2004, 36] Edellä mainittujen lisäksi hankaluutta aiheuttaa bioöljyn korkea alkalisisältö ja sen sisältämät erilaiset yhdisteet kuin dieselöljyssä [Vakkilainen, 8.12.2010].

Bioöljyn jatkojalostus liikennepolttoaineeksi vaatii hapenpoistoa, joka voidaan suorittaa lähinnä kahdella eri menetelmällä: vetykäsittelyllä ja katalyyttisellä krakkauksella. [Ringer et al., 2006, 27] Prosessointikustannukset ovat kuitenkin korkeat ja lopputuote ei ole kilpailukykyinen fossiilisten polttoaineiden kanssa. [Bridgwater, 2004, 37] Tarkemmin vetykäsittelyä on tutkinut mm. Elliot et al. (1987, 883-895) ja katalyyttistä krakkausta Diebold ja Scahill (1987, 264-276).

Bioöljyn jatkojalostusta liikennepolttoaineeksi on tutkittu kirjallisuudessa laajasti ja erilaisia katalyyttejä on esitetty käytettäväiksi. Jalostus liikennepolttoaineeksi on onnistunut laboratorio-olosuhteissa, mutta kaupallista sovellusta teknologialle ei vielä ole saatavilla. Mm. Honeywell UOP ennustaa teknologian olevan kaupallisesti saatavilla vuonna 2012. [Envergent Technologies, kotisivu]

#### 2.4.5 Yhteispoltto

Pyrolyysiöljyn yhteispolttoa (co-firing) fossiilisten polttoaineiden kanssa on tutkittu kaupallisella tasolla, etenkin suurissa hiili- ja maakaasuvoimaloissa. Manitowocissa, Wisconsinissa, Red Arrow Products Company on polttanut pyrolyysiöljyä hiilen kanssa 20 MW<sub>e</sub> stoker-polttimella varustetussa kattilassa 370 tunnin ajan 5 % pyrolyysiöljyn osuudella. Laitos toimi ilman suurempia ongelmia kustannustehokkaiden kattilamodifikaatioiden jälkeen. Päästötasossa, huolto-ohjelmassa tai tuhkan käsittelyssä ei havaittu vahingollisia vaikutuksia. [Chiaromonti et al., 2005, 1079]

Maakaasuvoimaloissa ei ole tuhkaneräyslaitteistoa, joten tuhkattomat polttoaineet ovat tuottajien erityisen mielenkiinnon kohteena. Zwollessa, Alankomaissa, on maakaasun kanssa poltettu 15 tonnia bioöljyä 350 MW<sub>e</sub> laitoksessa 1,9 t/h virtauksella. Bioöljy käyttäytyi yhteispoltossa samalla tavalla kuin kevytpolttoöljy eikä syöttösuuttimen kärjessä havaittu sakkautumia. Testi osoitti, että maakaasuvoimalat voivat käyttää bioöljyä minimaalisin jälkiasennuksin ja korkealla käyttövarmuudella. [Waagenar et al., 2004, 1-11]

## 2.5 Standardisointi ja lainsäädäntö

Pyrolyysiöljyn kaupallistumisen tärkeänä ehtona on lopputuotteen spesifikaatioiden määrittäminen. Elliot (1984) ehdotti jo 1980 – luvulla eri pyrolyysinesteille erittelystandardeja. Vuosikymmen myöhemmin samanlaista erottelua ehdotti IEA Pyrolysis Activity (PYRA), joka pohjautui potentiaalisten loppukuluttajien palautteeseen. ASTM ja vastaavanlaiset organisaatiot kussakin maassa ovat luoneet erittelyn polttoöljyille, joissa määritellään rajat ominaisuuksien vaihtelulle eri polttoaineluokille. [Oasmaa et al., 2005, 2162]

Vuonna 2009 julkaistiin ASTM D7544 -09 –standardi, joka määrittelee fysikaaliset ja kemialliset vaatimukset biomassasta tuotetuille pyrolyysiöljyille, jotka on tarkoitettu teollisille polttimille. Spesifikaatio on tarkoitettu käytettäväksi pyrolyysiöljyn ostosopimuksia ja käyttäjien opastusta varten. Standardi ei kata pyrolyysiöljyn käyttöä asuinlämmityksessä, pienissä kaupallisissa kattiloissa, moottoreissa tai merenkulkusovelluksissa. Standardin esittämät vaatimukset pyrolyysiöljyille on esitetty seuraavalla sivulla taulukossa 4. [astm.org, 20.10.2010]

**Taulukko 4:** Pyrolyysiöljyn keskeisimpien ominaisuuksien sallitut minimi-/maksimiarvot standardin ASTM D7544 -09 mukaan

Ominaisuus	Arvo	Koemenetelmä
Ylempi Lämpöarvo [MJ/kg]	15 min	ASTM D240
Pyrolyysiöljyn Kiintoainepitoisuus [wt%]	2,5 max	ASTMD7544
Vesipitoisuus [wt%]	30 max	ASTM E203
pH	Raportointi	ASTM E70
Kinemaattinen Viskositeetti [cSt @ 40 °C]	125 max	ASTM D445
Tiheys [kg/dm <sup>3</sup> @ 20 °C]	1,1 - 1,3	ASTM4052
Rikkipitoisuus [wt%]	0,05 max	ASTM 4294
Tuhkapitoisuus [wt%]	0,25 max	ASTM 482
Leimahduspiste [°C]	45 max	ASTM D93
Jähmepiste [°C]	-9 max	ASTM D97

Standardissa määritellään vaadittavat maksimi- tai minimiarvot pyrolyysiöljyn ominaisuuksille. Lisävaatimuksena on esitetty tasalaatuisuuden säilyminen keskipitkän ajan varastoinnissa, eikä neste saa erottua painovoiman vaikutuksesta kerroksiksi. Standardi määrittelee pyrolyysiöljyn kiintoainepitoisuuden testimenetelmän ja standardissa määriteltyjen ominaisuuksien merkityksellisyyden. Lisäksi standardi antaa ohjeita pyrolyysiöljyn varastoinnille, listaa pyrolyysiöljyyn liittyvät vaaratekijät, ja kuvaa pyrolyysiöljyn mikrobista kontaminaatiota.

### 3. RAAKA-AINE

Pyrolyysiprosessi vaatii raaka-aineelta tasalaatuisuutta. Itse raaka-aineeksi kelpaa lähes mikä tahansa orgaaninen biomassa, mutta realistisesti tarkastellen Suomen olosuhteissa raaka-aineeksi sopivat erityisesti puuperäiset biomassat. Raaka-aineen palakooksi suositellaan 3 – 6 mm, jolloin pyrolyysireaktori toimii optimaalisesti [Liukko, 20.12.2010].

Pyrolyysilaitoksen koko määritellään tyypillisesti biomassan kuiva-ainekulutuksen pohjalta. Esimerkiksi 100 BDMTPD (Bone Dry Metric Ton Per Day) laitos kuluttaa vuorokaudessa 100 tonnia täysin kuivaa biomassaa. Todellisessa päivittäisessä raaka-aineen tarpeessa tulee näin ollen huomioida raaka-aineen kosteus. Olettaen saapuvan raaka-aineen kosteuspitoisuudeksi keskimäärin 35 %, 100 BDMTPD laitoksen todellinen raaka-aineen tarve päivässä on 154 tonnia. Tilavuudellisesti määrä vastaa noin reilua 513 i-m<sup>3</sup>/d päivässä, kun oletetaan raaka-aineen tiheydeksi 300 kg/i-m<sup>3</sup> ja raaka-aineeksi haketta tai purua. Tällöin vuositasolla raaka-aineen tarve on noin 165 000 irtokuutiometriä. Käytetyt muuntokertoimet on esitetty taulukossa 5. Biomassan kuiva-ainetiheydeksi voidaan olettaa 400 kg/m<sup>3</sup>.

400 BDMTPD laitos tarvitsee vastaavasti 400 tonnia täysin kuivaa biomassaa vuorokaudessa, joten päivittäinen raaka-aineen tarve on 616 tonnia päivässä, mikä tilavuudellisesti vastaa noin 2050 i-m<sup>3</sup>/d. Vuositasolla 400 BDMTPD laitos tällöin tarvitsee 676 500 i-m<sup>3</sup>/a biomassaa.

**Taulukko 5:** Raaka-aineen kosteuden vaikutus saman irtokuutiotilavuuden energiasisältöön, tilavuuteen ja painoon [bioenergiaa metsästä 2003-2004, SLU]

Biomassa	Irtokuutiotilavuus [i-m <sup>3</sup> ]	Kosteus [%]	Kiintotilavuus [m <sup>3</sup> ]	Energiasisältö [MWh]	Paino [t]
Hake	1	35 - 40	0,37	0,8 - 1	0,28 - 0,31 t
Sahanpuru	1	50 - 55	0,32	0,6 - 0,7	0,29 - 0,34 t

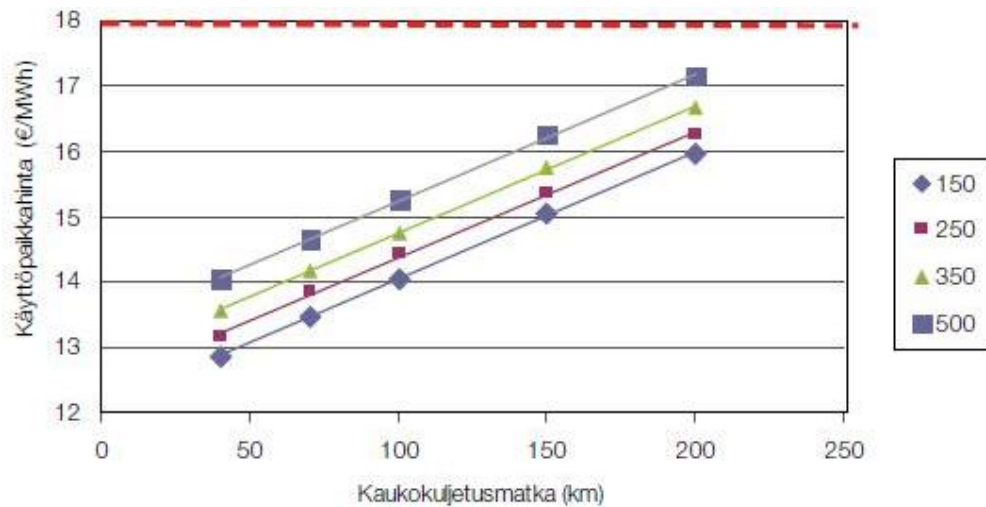
### 3.1 Raaka-aineen alueellinen saatavuus ja hinta

Biomassojen suhteellinen energiatiheys on sangen matala, mikä rajoittaa raaka-aineen taloudellista hankitaetäisyyttä. Tässä työssä bioöljyn tuotantolaitos ajatellaan sijoittuvaksi Savonlinnan alueelle ja biomassan hankinta suoritetaan noin 100 km säteellä sijoituspaikan ympäristöstä. Varteenotettaviksi raaka-ainemateriaaleiksi voisivat silloin tulla seuraavat biomassat:

- Kokopuuhake
- Metsähake
- Energiapuu
- Sahoilta saatava puru ja muut sivutuotteet
- Vaneri- ja kertopuuteollisuuden sivutuotteet (koivu ja kuusi)
  - o Purilaat
  - o Kuorijäte
  - o Liimatut reunapalat
  - o Muut jakeet

Kokopuuhake on karsimattomista rungoista valmistettua haketta. Metsähake puolestaan on yleisnimitys polttoaineelle, joka on valmistettu kokopuusta, rangasta, ainespuusta, pienpuusta tai hakkuutähteistä. [Metsäkeskus, 12.12.2010] Energiapuu on koneellisesti hakettua puuta ja käsittää käytännössä kaiken polttoon kelpaavan puutavaran. [Energiapuu.fi, 12.12.2010] Purilailla tarkoitetaan vaneriteollisuuden sorvauksesta ylijäävää sydänpuuta.

Raaka-aineen käyttöpaikkahintaan vaikuttaa suuresti sen kuljetusmatka. Kuvassa 6 on demonstroitu kuljetusmatkan vaikutusta hakkuutähdehakkeen käyttöpaikkahintaan. Metsäkuljetusmatkoina on käytetty 150, 250, 350 ja 500 metriä ja kaukokuljetusmatkoina 40, 70, 100, 150 ja 200 kilometriä.



**Kuva 6:** Käyttöpaikkahinta kuljetusmatkan fuktiona [Pelli, 2010, 42]

### 3.1.1 Metsäenergian teknillistaloudellinen potentiaali

Simola & Kola (2010) ovat kartoittaneet maakuntakohtaisesti metsäenergiapotentiaalin kolmella eri tasolla: teoreettisella, teknillistaloudellisella ja tarjontahalukkuuden mukaisella tasolla. Tarkastelun kohteena on ollut hakkuutähde-, pienpuu- ja kantopotentiaali. Etelä-Savon maakunnan osalta Simola ja Kola olivat päätyneet seuraavanlaiseen alueelliseen teknillistaloudelliseen potentiaaliin:

- hakkuutähde: 390 000 kiintokuutiometriä (316 000 t)
- pienpuu: 600 000 kiintokuutiometriä (486 000 t)
- kanto: 260 000 kiintokuutiometriä (227 000 t)

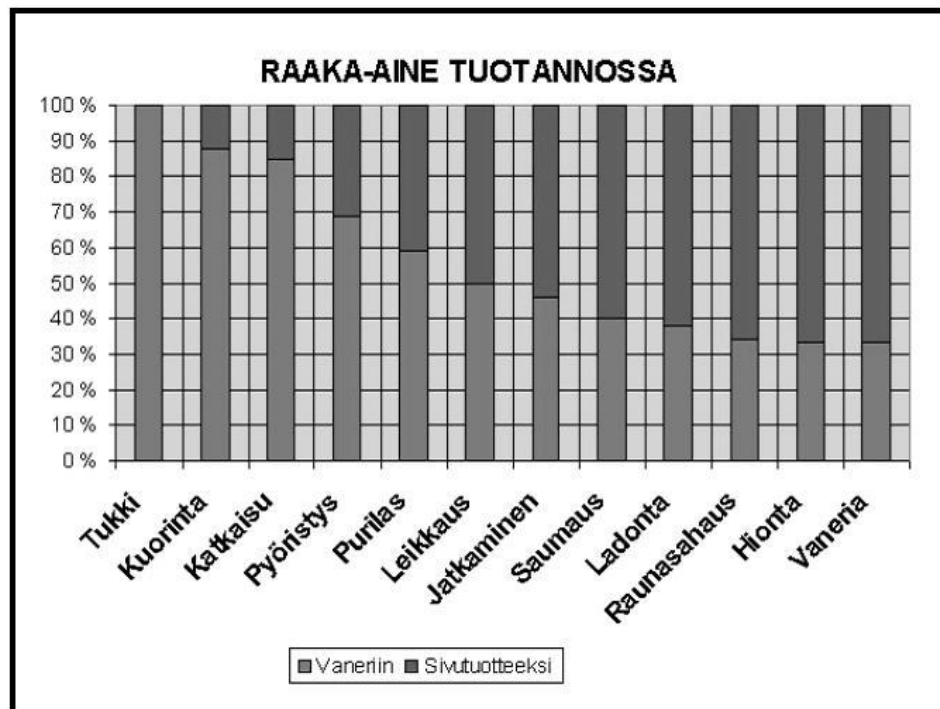
Teknillistaloudellisella tasolla kokonaispotentiaalia on supistettu teknisten ja taloudellisten rajoitteiden mukaisesti. Ulkopuolelle on jätetty korjuuseen sopimattomat kohteet, sekä kohteet joiden energiapuun korjuu ei ole taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi sopivilta kohteilta ei käytännössä ole mahdollista saada talteen kaikkea bioenergiaksi sopivaa biomassaa, vaan esimerkiksi koneiden ja korjuun tekniikasta riippuen biomassan saanto vaihtelee. [Simola & Kola, 2010, 13]

Kaiken kaikkiaan teorettinen potentiaali Etelä-Savossa oli 3 miljoonaa kiintokuutiometriä, josta teknillistoloudellinen potentiaali oli 1 250 000 kiintokuutiometriä. Verrattuna Etelä-Savon metsähakkeen käyttöön käyttämätöntä potentiaalia oli 976 000 kiintokuutiometriä. Tutkimuksessa energiapuu oli oletettu korjattavan tuoreena ja kantopotentiaali rajoitettiin koskemaan ainoastaan kuusen päätehakkuita, koska kuusen juurakko on helpompi irrottaa ja paloitella kuin männyn juurakko. [Simola & Kola, 2010, 15-33]

Muuttaen edellä laskettu Etelä-Savon käyttämätön teknillistoloudellinen metsäenergiapotentiaali irtokuutiometreiksi, olettaen että se haketetaan ja hakkeen tiheyden olevan taulukon 5 mukainen, saadaan teknillistoloudelliseksi raaka-ainemääräksi noin 3,25 miljoonaa irtokuutiometriä. Tästä määrästä 100 BDMTPD laitoksen raaka-aineen tarve  $165\,000\text{ i-m}^3/\text{a}$  on siis noin 5 % ja 400 BDMTPD laitoksen  $676\,500\text{ i-m}^3/\text{a}$  vastaavasti noin 21 %.

### 3.1.2 Vaneri- ja kertopuuteollisuuden teorettinen sivuainevirtapotentiaali

Vanerintuotannossa vain pieni määrä käytetystä raaka-aineesta saadaan lopputuotteeseen. Kuvan 7 mukaisesti voidaan teorettisesti arvioida sivuainevirtojen määrät alueellisissa vaneritehtaissa, kun tunnetaan vanerintuotannon määrä. Pyrolyysiprosessin raaka-aineeksi soveltuvan osuuden koko vanerintuotantoprosessin raaka-aine määrästä voidaan olettaa olevan noin 60 % kuoren, hakkeen ja sahanpurun muodossa.



**Kuva 7:** Raaka-aineen käyttö vanerin tuotannossa [Immonen, 2010]

Tarkasteltavat laitokset ovat UPM-Kymmene Oy:n Savonlinnan, Joensuun ja Pelloksen vaneritehtaat. Tämän lisäksi Punkaharjulla on Finnforest Oy:n vaneri- ja kertopuutuotantolaitos. Taulukkoon 6 on kasattu laitosten tuotantokapasiteetit ja niiden pohjalta lasketut raaka-aineiksi soveltuvien sivuainevirtojen summat irtokuutiometreinä. Alkuperäisestä raaka-ainemäärästä on oletettu 60 % saatavan käyttöön ja irtotiheyden olevan  $0,300 \text{ t/m}^3$ -i. UPM:n Savonlinnan vaneritehtaan tuotantokapasiteetissa on otettu huomioon tuleva kapasiteetin lisäys. Tuotantolaitosten itse energiantuotantoon käyttämien sivuainevirtojen osuutta ei ole potentiaalisissa otettu huomioon.

**Taulukko 6:** Savonlinnan seudun ja lähialueiden vaneri- ja kertopuuteollisuuden teoreettiset sivuainevirtapotentiaalit

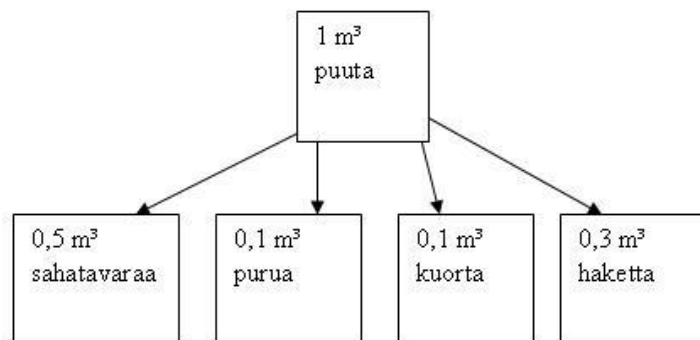
Laitos	Tuotantokapasiteetti [t/a]	Sivuainevirtapotentiaali [i-m <sup>3</sup> ]
Savonlinna <sup>1</sup>	120 000	1 000 000
Joensuu <sup>1</sup>	55 000	458 000
Pellos <sup>1</sup>	480 000	4 000 000
Punkaharju <sup>2</sup>	70 000	583 000

1) Lähde: [UPM-Kymmene Oy, 2009]

2) Lähde: [Taiponen, 23.11.2010]

### 3.1.3 Sahateollisuuden teoreettinen sivuainevirtapotentiaali

Sahateollisuudessa noin puolet käytetystä raaka-aineesta saadaan jalostettua sahatavaraksi. Puusta saatavien sivuainevirtojen suhteelliset osuudet on esitetty alla kuvassa 8. Pyrolyysiprosessiin soveltuvan sivuainevirran raaka-ainepotentiaalin määräksi saadaan tällöin 50 %, kun oletetaan kaiken sivuaineen soveltuvan prosessiin.



**Kuva 8:** Puusta saatavien sivutuotteiden osuudet [Takoja, 2009]

Tarkasteltavat laitokset ovat Stora Enso Oyj:n Kiteen, Uimaharjun ja Varkauden sahat. Tämän lisäksi mukana ovat Sahakuutio Oy:n Kerimäen ja Kaivospuu Oy:n Hammaslahden sahat, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 110 000 kiintokuutiometriä vuodessa, ja Iisveden Metsä Oy:n saha Iisvedellä. Taulukossa 7 on esitetty sahojen tuotantokapasiteetit ja lasketut

sivuainevirtapotentiaalit irtokuutiometreinä. Alkuperäisestä raaka-ainemäärästä on oletettu 50 % saatavan käyttöön ja irtotiheyden olevan 0,300 t/m<sup>3</sup>-i. Sahojen omaa sivuainevirtakäyttöä ei ole potentiaalissa otettu huomioon. Pienet sahalaitokset on myös jätetty pois tarkastelusta.

**Taulukko 7:** Savonlinnan seudun lähialueen sahalaitosten tuotantomäärät ja sivuainevirtapotentiaalit

Laitos	Tuotantokapasiteetti [t/a]	Sivuainevirtapotentiaali [m <sup>3</sup> -i]
Kitee <sup>1</sup>	380 000	1 267 000
Uimaharju <sup>1</sup>	300 000	1 000 000
Varkaus <sup>1</sup>	345 000	1 150 000
Kerimäki & Hammaslahti <sup>2</sup>	110 000	367 000
Iisvesi <sup>3</sup>	100 000	333 000

1) Lähde: [Stora Enso Oyj, 2004, EMAS-selonteko]

2) Lähde: [Sahakuutio Oy, kotisivut]

3) Lähde: [Iisveden Metsä Oy, kotisivu]

### 3.1.4 Savonlinnan seudun käytettävissä olevat raaka-aineresurssit

Puunjalostusteollisuus käyttää tehokkaasti hyödykseen prosessiensa sivuainevirrat. Vaneriteollisuudessa kaikille sivutuotteille on teollinen tai energiantuotannollinen käyttökohde, joka esimerkiksi UPM:n laitosten kohdalla tarkoittaa, että sivutuotteet käytetään UPM:n omassa tai yhteistyökumppaneiden toiminnassa. [Nousiainen, 21.10.2010] Samoin Finnforestin Punkaharjun laitoksen sivuainevirrat käytetään suurimmaksi osaksi omalla voimalaitoksella energiantuotantoon. [Taiponen, 23.11.2010]

Sahateollisuus noudattaa samaa kaavaa vaneriteollisuuden kanssa. UPM:n sahojen sivuainevirrat käytetään itse ja loput lähinnä konsernin sisällä. Esimerkiksi Kiteen saha käyttää kuoren itse energiaksi ja sahanpuru toimitetaan Kotka Mills:n tehtaille. Vuositasolla sahan purua syntyy 60 000 kiintokuutiometriä ja haketta noin 200 000 kuutiometriä, joka käytetään

konsernin sisällä. [Pussinen, 28.10.2010] Sahakuutio Oy:ltä jää poikkeuksellisesti hieman ylijäämäsvivurtoja, jotka ovat kaupan: 12 000 m<sup>3</sup> purua, 6 000 m<sup>3</sup> kuorta ja 19 000 m<sup>3</sup> kuituhaketta. [Suomalainen, 21.10.2010] Määrällisesti ylijäämäsvuainevirrat voivat toimia korkeintaan bioöljyn tuotantolaitoksen sivuraaka-ainevirtana.

Alueellisesti varteenotettavan raaka-ainevirran tarjoavat lähinnä energiapuu (pienpuu, kanto, jne.) ja eri hakelajit sekä kuitupuu. Energiapuun alueellinen saatavuus on hyvä ja terminaalihinta on noin 28 – 32 € kiintokuutiometriltä [Pylkkänen, 20.10.2010]. Vastaavasti metsähakkeen tuotantomahdollisuudet ovat Etelä-Savossa merkittävästi suuremmat kuin alueen energiantuotantolaitosten käyttömahdollisuudet [Asplund et al., 2009, 13]. Alla taulukossa 8 on esitetty L&T Biowatin tarjoamat varteenotettavat raaka-aineet ja niiden käyttöpaikkahinnat. [Olenius, e-mail, 12.10.2010] Palakoko normaalitoimituksissa on noin 40 – 60 mm, joka vaatii lisähaketusta tai murskausta käyttöpaikalla.

**Taulukko 8:** L&T Biowatin tarjoamia raaka-aineita ja niiden hintoja 2010 [L&T Biowatti]

	Metsätähdehake	Kokopuuhake	Puru
Hinta [€/MWh]	18	18	17 - 18
Energiatiheys [MWh/t]	2,75	2,75	1,8 - 1,9
Kosteus [%]	35 - 45	30 - 40	50 - 55

Taulukossa 8 annetut energiajakeiden hinnat on 2010 syksyn keskihintoja, jotka sisältävät koko korjuuketjun eli biomassan korjuun, haketuksen ja kuljetuksen kustannukset. Kuljetusmatkan kasvaessa nousee myös energiajakeen käyttöpaikkahinta kuvan 5 mukaisesti.

Vaihtoehtoisesti tarvittava raaka-aine voidaan hankkia energiarankana tai kuitupuuna. Kuitupuun (mänty) hankintahinta on 30,8 €/m<sup>3</sup> [Metsänhoitoyhdistys, 4.1.2011], joka sisältää puun hinnan lisäksi korvauksen hakkuusta ja puutavaran lähikuljettamisesta (metsäkuljetus). Mikäli oletetaan kuljetuskustannusten (kaukokuljetus) olevan noin 6 €/m<sup>3</sup> [Ranta, 14.11.2010] on käyttöpaikkahinta noin 39 €/m<sup>3</sup> (19,5 €/MWh).

Hakettamattoman energiapuun ja energiarangan tienvarsihintaa suurille laitoksille on noin 16 €/m<sup>3</sup> [Metsänomistajien liitto, 4.1.2011]. Mikäli oletetaan edelleen kuljetuskustannuksiksi 6 €/m<sup>3</sup>, saadaan käyttöpaikkahinnaksi 22 €/m<sup>3</sup> (11 €/MWh). Simolan & Kolan (2010) arvion mukaan Etelä-Savon teknillistaloudellinen pienpuupotentiaali on noin 600 000 m<sup>3</sup> (kiintokuutiometriä), joka on reilu kaksi kertaa suuremman laitoksen (400 BDMTPD) vuotuinen kostean raaka-aineen tarve.

### 3.1.5 Yhteenveto saatavuudesta ja hinnasta

Pyrolyysiöljyn tuottamiseen käytettävän raaka-aineen hinta vaihtelee erillistuotantolaitokselle välillä 11 – 20 €/MWh, riippuen käytettävästä biomassasta ja sen tuotantoketjusta. Metsäteollisuuden sivuainevirrat ovat tehokkaasti sidottu muuhun käyttöön tällä hetkellä, mutta tilanne voi muuttua tulevaisuudessa toimitussopimusten umpeutuessa. Laskennassa käytetään oletusarvoisesti raaka-aineena kokopuuhaketta, jonka alueellinen saatavuus on hyvä ja hintana 18 €/MWh (36 €/m<sup>3</sup>), jolloin raaka-ainetta varmasti on saatavilla. Raaka-aine on tällöin noin 35 % kostea palakooltaan 40 – 60 mm valmista haketta.

Integroidulle tuotantolaitokselle käytetään laskennassa raaka-aineen hinnaksi 10 – 13 €/MWh [Vakkilainen, 21.11.2010], jolloin hypoteettisesti oletetaan laitoksen tulevaisuudessa saavan tarvitsemansa raaka-aine emolaitoksen sivuainevirrasta. Tällöin osa raaka-aineen hinnasta on jo maksettu. Kuitenkaan kaikkea tarvittavaa raaka-ainetta tuskin on mahdollista saada suoraan

sivuainevirtana, jolloin joudutaan myös tarkastelemaan tilannetta, jossa osa biomassasta hankitaan energiarankana. Herkkyystarkastelussa luvussa 6.6.2 on tarkasteltu raaka-aineen hinnan muutoksen vaikutusta pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen.

## 4. PYROLYYSIÖLJYN ALUEELLISET MARKKINAT

Ensimmäiset markkinat biomassajohdannaiselle pyrolyysiöljylle voi olla paikallisten lämpövoimaloiden polttoaineiden korvaaminen. Pyrolyysiöljyllä on mahdollisuus päästä sähköntuotantomarkkinoille paikallisilla markkinoilla, mutta vain tietyissä maissa. [Oasmaa et al., 2005, 2163] Lyhyellä aikavälillä kannattavuus saavutetaan parhaiten selvittämällä alueelliset markkinaraot ja pyrolyysiöljyn erikoispiirteet. Näihin sisältyvät: [Bridgwater, 2002, 182]

- Maat tai alueet, joilla on kannustejärjestelmä uusiutuvalle energialle
- Alueet, joissa on korkea sähkön hinta
- Jätteenhävitysmahdollisuudet (Tuotetaan biojätteestä pyrolyysiöljyä)
- Valmius varastoida pyrolyysiöljyä puskuriksi yksikön alasarjoja vastaan, tai polttoaineeksi huippukuormalaitoksille
- Erotusmahdollisuudet, missä iso yksittäinen pyrolyysituotantolaitos toimittaa polttoainetta usealle pienelle ja syrjäiselle sähkön ja/tai lämmön tuottajalle
- Pienen mittakaavan CHP – laitokset ja niihin liittyvät mahdollisuudet
- Ylijäämähiilen myynti
- Potentiaalinen erikoiskemikaalien ja polttoaineen yhteistuotanto

Pyrolyysiöljy kuuluu uusiutuvan energian tukien piiriin ja energiaverottomuus parantaa sen kilpailukykyä lämmöntuotantomarkkinoilla. Etelä-Savossa potentiaalisia markkinoita ovat fossiilisia polttoöljyjä- ja kaasuja käyttävät lämpökeskukset ja voimalaitokset sekä meesauunit. Pyrolyysiöljyn ensisijainen käyttökohde on raskasta polttoöljyä käyttävät laitokset ja kyseiset kohteet soveltuvat teknisesti pyrolyysiöljyn käytölle. Lisäksi pyrolyysiöljy voi olla harkittava vaihtoehto uudis- ja muutoskohteissa, joissa mietitään tulevaisuuden polttoainevalintoja.

## 4.1 Lämpökeskukset ja voimalaitokset

Kaukolämpölaitokset ovat Suomessa suuri potentiaalinen markkina pyrolyysiöljylle. Vuonna 2004 niissä kulutettiin 8 PJ (2 222 GWh) raskasta polttoöljyä, joka ekvivalenttisesti vastaa 460 000 tonnia pyrolyysiöljyä, eli noin kymmentä kapasiteetiltaan 200 BDMTPD tuotantolaitosta. [Bradley, 2006, 49]

Pyrolyysiöljyn potentiaaliset alueelliset markkinat on lämpövoimaloiden osalta kartoitettu käyttäen kaukolämmön ja yhteistuotannon tuottajien ilmoittamia tuotantoon käytettyjä polttoainemääriä. Alla Taulukossa 9 on esitetty kevyttä polttoöljyä, raskasta polttoöljyä tai maakaasua käyttävät alueelliset laitokset, jotka edustavat potentiaalisia markkinoita pyrolyysiöljylle Itä-Suomessa. Alueen rajaukseksi valittiin maksimikuljetusetäisyys suurien fossiilisten polttoaineiden kuluttajien kohdalla noin 200 km, ja pienten ja keskisuurten kuluttajien noin 150 km Savonlinnasta.

**Taulukko 9:** Itä-Suomen alueellisen kaukolämmön ja CHP-laitosten fossiilisten polttoaineiden kulutus [Energiateollisuus Ry, 2009]

Paikkakunta	Lämmöntuottaja	Raskas polttoöljy	Kevyt Polttoöljy	Maakaasu	Etäisyys Savonlinnasta	Potentiaali Pyrolyysiöljynä
		GWh	GWh	GWh	km <sup>1</sup>	km <sup>2</sup>
Mikkeli	Etelä-Savon Energia Oy	13,2	3,2	-	104,0	3280
Joensuu	Fortum Oy	67,1	0,6	-	-	13 540
Imatra	Imatran Lämpö	-	-	81,8	124,0	16 360
Joroinen	Joroisten Energialaitos	11,0	-	-	-	2 200
Kitee	Kiteen Lämpö Oy	10,9	-	-	84,1	2 180
Kuopio	Kuopion Energia	265,0	2,3	-	160,0	53 160
Outokumpu	Outokummun Energia Oy	7,1	-	-	148,0	1 420
Leppävirta	Savon Voima Oyj	24,3	0,2	-	107,0	4 900
Pieksämäki	Savon Voima Oyj	6,6	0,6	-	121,0	1 440
Siilinjärvi	Savon Voima Oyj	18,1	-	-	181,0	3 620
Suonenjoki	Savon Voima Oyj	13,2	1,5	-	149,0	2 940
Juva	Suur-Savon Sähkö Oy	4,3	0,1	-	60,0	8 800
Kangasniemi	Suur-Savon Sähkö Oy	1,5	1,6	-	156,0	420
Kerimäki	Suur-Savon Sähkö Oy	2,6	-	-	22,0	520
Mäntyharju	Suur-Savon Sähkö Oy	4,7	-	-	146,0	940
Puumala	Suur-Savon Sähkö Oy	2,3	-	-	76,0	460
Rantasalmi	Suur-Savon Sähkö Oy	0,8	0,1	-	42,0	180
Savonlinna	Suur-Savon Sähkö Oy	16,2	0,2	-	0,0	3 280
Tohmajärvi	Vapo Oy	1,7	-	-	103,0	340
Varkaus	Varkauden Aluelämpö Oy	4,8	-	-	86,0	960
Imatra	Imatran Energia Oy	-	-	129,6	124,0	25 920
Kouvola	KSS Energia Oy	-	-	43,0	209,0	8 600
Lappeenranta	Lappeenrannan Lämpövoima Oy	-	8,5	764,8	157,0	154 660
Heinola	Stora Enso Oyj	45,0	-	-	199,0	9 000
<b>YHTEENSÄ</b>		<b>520,4</b>	<b>18,9</b>	<b>1019,2</b>		<b>319120</b>

Yhteensä alueellinen maksimaalinen fossiilisen polttoaineen kulutus vuonna 2009 oli noin 1500 GWh, mikä vastaa pyrolyysiöljynä noin 320 000 tonnia, kun oletetaan pyrolyysiöljyn lämpöarvoksi 18 MJ/kg (5 €/MWh). Maakaasuputken alueella kulutettiin ainoastaan maakaasua, muualla lähinnä raskasta polttoöljyä. On syytä huomata, että taulukon arvot ovat vuodelta 2009, ja nykytilanne voi poiketa huomattavastikin esitetystä.

## 4.2 Meesauunit

Suomessa meesauuneissa käytettiin polttoaineita vuonna 2005 13,6 PJ (3 777 GWh). Tämä vastaisi 765 000 tonnin bioöljypotentiaalia, eli noin 17 mittakaavaltaan 200 BDMTPD tuotantolaitosta. [Bradley, 2006, 46]

Alueelliset markkinat kartoitettiin selvittämällä noin 200 km säteellä olevien meesauunien vuosittainen maakaasun ja raskaan polttoöljyn kulutus laitoskohtaisesti. Selvitys toteutettiin puhelinhaastatteluina. Selvityksen tulokset on esitetty alla taulukossa 10. Haastatellut olivat meesauuneista vastaavia henkilöitä, lähinnä käyttöpäälliköitä.

**Taulukko 10:** Alueellisten meesauunien fossiilisten polttoaineiden kulutus

Laitos	Polttoaine	Kulutus	Kiinnostunut pyrolyysiöljystä
A	Maakaasu	320 GWh	Kyllä
B	Maakaasu	250 GWh*	Kyllä
C	Maakaasu	320 GWh	Ei
D	Maakaasu	140 GWh	Kyllä
E	RPÖ	228 GWh	Kyllä
F	Puukaasu	91 GWh	Ei
G	RPÖ	25 GWh	Kyllä
H	RPÖ	171 GWh	Kyllä

Pääsääntöisesti laitoksilla on kiinnostusta pyrolyysiöljyä kohtaan tietyin teknillistaloudellisin reunaehdoin. Poikkeuksena ovat Joutsenon sellutehdas, jossa suunnitellaan siirtymistä tuotekaasun käyttöön, ja Varkauden tehdas, jossa käytetään puukaasua. Äänekosken tehtaan meesauuni on alimitoitettu ja vaatii polttoaineelta erittäin tasalaatuista koostumusta. Lappeenrannan Kaukaan tehtaan kulutus (merkitty tähdellä) on karkea suuntaa-antava arvio. Kuopion laitoksella käytetään polttoaineena lähinnä turvetta ja raskaspolttoöljy on tukipolttoaineena.

Yhteensä alueen meesauuneissa käytetään fossiilisia polttoaineita noin 1545 GWh. Vähentämällä tästä summasta Joutsenon ja Varkauden osuus saadaan meesauunien potentiaalinen markkina pyrolyysiöljylle, joka vastaa noin 230 000 tonnia pyrolyysiöljyä vuodessa, kun oletetaan pyrolyysiöljyn lämpöarvoksi 18 MJ/kg. Meesauunien kuluttama fossiilisten polttoaineiden määrä on muutettu yksikköön GWh, jotta maakaasun ja raskaan polttoöljyn käyttömäärät olisivat paremmin vertailtavissa.

Tärkeimmät reunaehdot pyrolyysiöljyn käytölle meesauuneissa ovat hinnan lisäksi käyttövarmuus ja lisähuollontarve. Lisähuollontarvetta voi tuoda pyrolyysiöljyn sisältämä vesi, mikä voi johtaa renkaan muodostumiseen kalkkiuunin seinämille (uudelleenkarbonoitumiseen) pidemmällä aikavälillä. Jotta pyrolyysiöljyä voidaan kaupallisesti alkaa käyttämään meesauuneissa, tarvitaan pidempiaikaisia koeajoja (>kuukausi). Pyrolyysiöljyn käytön vaatimat laitekustannukset ovat marginaaliset metsäteollisuuden mittakaavassa, eikä pieni poikkeama pyrolyysiöljyn laadussa käytännössä haittaa. [Törmikoski, 27.10.2010] [Kaikkonen, 27.10.2010]

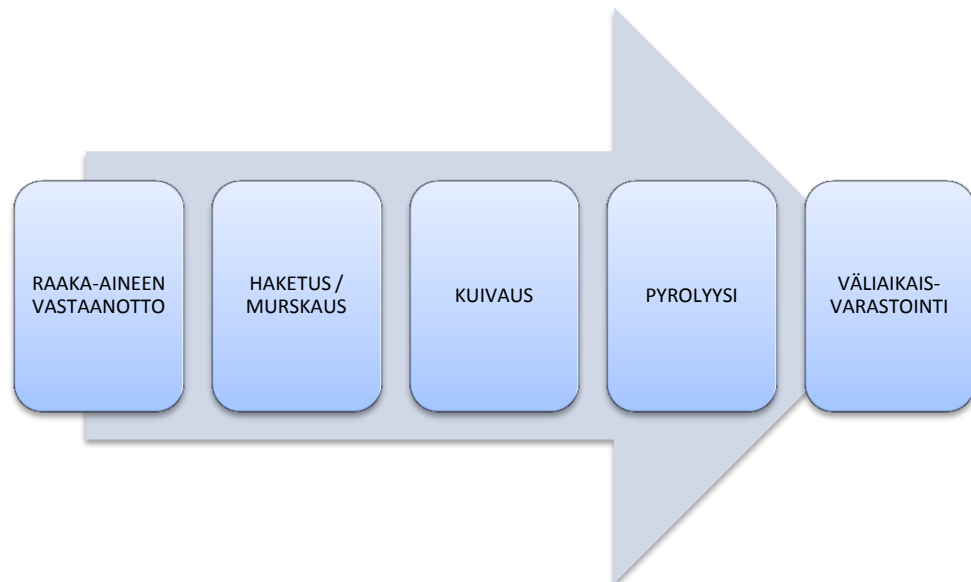
### 4.3 Muut

Muita mahdollisia markkinoita pyrolyysiöljylle edustavat esimerkiksi kasvihuoneet, jotka vuonna 2006 käyttivät Etelä-Savossa öljyä noin 13 GWh, josta noin 80 % oli raskasta polttoöljyä. [Karhunen, 14.12.2010] Eräs mielenkiintoinen mahdollinen markkina voi olla laivaliikenne, jolla on tulossa suuria ongelmia rikkipäästöjen kanssa. Siirtyminen vähempi rikkiseen polttoaineeseen voi kustantaa Suomelle yli miljardi euroa vuodessa. [Tekniikka & Talous, 19.8.2010] Alueellisesti muita pieniä mahdollisia käyttökohteita voivat olla myös sairaaloiden yms. oma varavoimantuotanto tai huipunkäytön alueelliset varavoimakattilat.

## 5. BIOÖLJYN TUOTANTOLAITOKSEN KUVAUS

Bioöljyn tuotantolaitos muodostuu osaprosesseista, jotka ovat raaka-aineen vastaanotto, haketus tai murskaus, kuivaus, varsinainen pyrolyysivaihe ja lopputuotteen varastointi (kuva 9). Tässä työssä on oletettu raaka-aineen olevan kokopuuhaketta, joka on mahdollista murskata suoraan sopivaan palakokoon.

Toinen mahdollisuus on hankkia raaka-aine suoraan tukkina ja rankana, jolloin biomassa pitää ensin hakettaa ja esikuivata, jota seuraa murskaus ja kuivaaminen ennen pyrolyysivaiheeseen syöttöä. Tämän tapainen raaka-aineen käsittelyvaihe on esitetty liitteessä 2.



**Kuva 9:** Bioöljyn tuotantolaitoksen prosessin eteneminen

Prosessi alkaa raaka-aineen vastaanotosta, jonne käytettävä biomassa – eli tässä tapauksessa palakooltaan 40 – 60 mm kokopuuhake noin 35 % kosteudessa – toimitetaan rekka-autoilla. Raaka-aine varastoidaan siloihin, jotka ovat metallisia kartionmallisia varastosäiliöitä. Niistä raaka-ainetta siirretään hihnakuljettimella vasaramurskaimelle, joka murskaa biomassan noin 3 – 6 mm palakokoon. Vasaramurskaimelta raaka-aine edelleen kuljetetaan hihnakuljettimella kuivuriin, jossa se kuivataan 5 – 8 % kosteuteen pyrolyysiyksiköstä saatavalla kuumalla kuivauskaasulla. Oletetaan, ettei erillistä seulontaa tarvita. Kuivattu, hienojakoinen raaka-aine syötetään

pyrolyysiyksikön kaasutusreaktoriin ruuvikuljettimella, jossa se kaasuuntuu ja lopulta tiivistyy kondensaattorissa bioöljyksi. Lopulta tuotettu bioöljy pumpataan haponkestävään varastosäiliöön odottamaan kuljetusta loppukäyttäjälle.

Nopeaan pyrolyysiin perustuvan bioöljyn tuotantolaitoksen sydän on pyrolyysiyksikkö, jonka prosessi on kuvattu luvussa 2.1. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan bioöljyn tuotantolaitoksen muita prosessivaiheita ja -laitteita sekä tarvittavia tiloja, ja arvioidaan 100 ja 400 BDMTPD tuotantolaitosten tarvitsemia laitekoko- ja tilatarpeita.

## 5.1 Raaka-aineen vastaanotto

Raaka-aineen vastaanottotilat määräytyvät pitkälti sen mukaan, missä muodossa raaka-aine saapuu, ja minkä kokoinen puskurivarasto tarvitaan. Oletetaan saapuvan raaka-aineen olevan kokopuuhaketta ja puskurivaraston olevan 100 BDMTPD laitoksen 3 päivän raaka-ainetarve, joka vastaan noin 15 tukkirekallista. Varastosiiloksi riittää tällöin 2000 m<sup>3</sup> kartiosäiliö. Raaka-aine siirretään varastosiiloon hihnakuljettimella. 400 BDMTPD laitokselle käytetään vajaata päivän puskurivarastoa, jolloin varaston koko saadaan pidettyä kurissa ja raaka-ainetta tarvitaan noin 20 tukkirekallista päivässä. Mikäli osa raaka-aineesta on energiarankana, tarvitaan nosturi ja mahdollisesti iso kauhakuormaaja [Tirkkonen, 8.11.2010]. Raaka-aineen vastaanotto- ja käsittelykentän pinta-alantarpeeksi voidaan olettaa 0,5 – 1 ha.

## 5.2 Haketin tai murskain

Riippuen Biomassan laadusta ja palakoosta, tarvitaan joko haketin tai murskain. Hakettimilla pienennetään biomassaa mekaanisesti haluttuun kokoluokkaan.

Hakettimia on hyvin monia eri tyyppisiä riippuen hakettavan raaka-aineen muodosta, laadusta ja ominaisuuksista. Niitä on suunniteltu mm. kokopuun, sahapintojen, ensiharvennuspuun ja hakkuujätteiden, kuten latvusten hakettamiseen. Tuloksena saadaan selluhaketta, lämmityshaketta, kuivikehaketta eläimille, haketta kasvustojen ja kenttien peittämiseen puutarhaviljelyksessä, viherrakentamisessa jne. Hakkureiden terätyyppejä vaihtamalla voidaan tuottaa erikokoista haketta. [Laimet Oy, 5.11.2010] Tarvittavan hakettimen tyyppi riippuu oleellisesti siitä onko laitokselle tuleva raaka-aine pyöröpuuta vai jotain muuta (esim. haketta tai murskaa). Monen eri haketuslinjan rinnakkaiskäyttö ei ole taloudellisesti järkevää, joka ohjaa raaka-aineen hankintaa yhden pääraaka-aineen käytön suuntaan.

Pyöröpuun hakettaminen 3 – 6 mm pituiseksi hakkeeksi onnistuu esimerkiksi kiekkohakkurilla, jolla saadaan helposti pääosa materiaalista haluttuun kokoluokkaan. Normaalisissa prosesseissa ei kuitenkaan voida välttää sitä, että mukaan jää joitain ylisuuria palasia, jotka täytyy erottaa seulomalla 2 – 5 % materiaalivirrasta jälkikäsiteltäväksi tai rejektiksi. Samanaikaisesti muodostuu pieni määrä (n. 1 % <3 mm) hienojaetta. Käytettäessä pelkästään pyöröpuuta energian kulutuksen säästämiseksi kannattaa hakata suoraan pientä haketta, jolloin haketukseen kuluva energia olisi noin 6 – 8 kWh/BDMT (kilowattituntia/kuiva-ainetonni). [Kahilahti, 20-21.10.2010]

Ostohakkeen tai murskeen pienentäminen tiettyyn palakokoon voidaan tehdä esimerkiksi rostipohjaisella vasaramyllyllä, jossa kuitenkin huomattava osa materiaalista pienenee tavoiteltua kokoa pienemmäksi puruksi tai pölyksi. Jos hienojae ei sovi prosessiin täytyy se erottaa seulomalla, jolloin raaka-ainehävikki voi nousta huomattavaksi. Käytettäessä ostohaketta, jonka palakoko vastaa normaalia markkinahaketta, täytyy se jauhaa hienommaksi. Vasaramyllyn kuluttama energia jauhettaessa kokoluokkaan 3 – 6 mm on noin 30 kWh/t. [Kahilahti, 20-21.10.2010]

Normaalisti tällaiseen tuotantolinjaan tarvitaan hakkurin tai vasaramyllyn lisäksi puun syöttö- ja purkauslaitteet. Pelkkä hakkuri tai vasaramylly muodostaa vain

osan kokonaiskustannuksesta. Lisäksi tarvitaan betoniperustukset ja yleensä rakennus melun leviämisen estämiseksi sekä sähköistys-, automaatio- ja turvajärjestelmät. [Kahilahti, 20-21.10.2010]

Oletetaan tässä työssä biomassan saapuvan kokopuuhakkeena, joka saadaan murskattua suoraan riittävään palakokoon, eikä raaka-aineen kosteuden häiritsevän murskausta. Lisäksi oletetaan, että optimipalakokoa pienemmät ja suuremmat raaka-ainejakeet sopivat prosessiin, eikä erillistä seulontaa tarvita.

### 5.3 Kuivuri

Kuivureita on hyvin monia eri tyyppisiä, jotka soveltuvat erilaisille biomassoille; suoraan- ja epäsuoraan lämmitettävät pyörivät kuivurit, kuljetinkuivurit, kaskadikuivurit, paineilmakuivurit, kuumavirtakuivurit ja mikroaaltokuivurit. Tarkoitukseen soveltuvan kuivurin valinta riippuu raaka-aineen ominaisuuksista ja palakoosta, investointikustannuksista, käyttö- ja kunnossapitovaatimuksista, ympäristöpäästöistä, energiatehokkuudesta, käytävissä olevista lämpövirroista, vapaasta tilasta ja potentiaalisesta tulipalovaarasta. [Roos, 2008, 8]

Pyrolyysiprosessin raaka-aineen kuivaukseen on tässä yhteydessä valittu Saimatec Oy:n energiatehokas Biomass Dryer, joka kapasiteetiltaan soveltuu 100 BDMTPD pyrolyysiyksikölle. Kuivuri toimii ristivirtausperiaatteella. Raaka-aine syötetään yläosan syöttösiiloon, josta se hiljalleen painovoiman vaikutuksesta etenee alaspäin kuivurin läpi, jolloin mekaanisen tehon tarve on pieni, ja kuivuu tavoitekosteuteen. Raaka-aineen läpimeno aika on tyypillisesti noin 1 – 2 tuntia, riippuen käytetystä kuivauskaasunlämpötilasta ja kuivattavan materiaalin palakoosta. Lisäksi läpäisy aikaan vaikuttaa raaka-aineen sisäänsyöttökosteus ja lopputavoitekosteus. Kuivurin tarvitsema lämpö voidaan kehittää erillisellä lämmönkehittimellä tai ohjata pyrolyysiprosessin ylijäämälämpö kuivurin käyttöön, joka on energiataloudellisempi vaihtoehto. Kuivauskaasun optimilämpötila saavutetaan puhaltamalla kuuman kaasuvirran sekaan ulkoilmaa tarkoitukseen sopiva määrä. [Saimatec Oy, 2.11.2010]

[Rasmus, 1.11.2010] Oletetaan, että kaikki kuivaukseen tarvittava lämpö saadaan pyrolyysiprosessista.

#### 5.4 Pyrolyysiöljysäiliö

Pyrolyysiöljysäiliön on tarkoitus toimia tuotetun pyrolyysiöljyn tilapäisvarastona. Tässä työssä on arvioitu, että varastointisäiliön kapasiteetti tulee mitoittaa vastaamaan noin viikon 100 BDMTPD laitoksen bioöljytuotantoa ja on valmistettu haponkestävästä teräksestä (1.4404). Pyrolyysiöljyn varastointiin soveltuu esimerkiksi Terästorni Oy:n valmistama 500 m<sup>3</sup> kartiomainen säiliö sisältäen tarvittavat yhteet. [Vilhu, 16.11.2010] Laskennassa 400 BDMTPD laitoksen oletetaan käyttävän samankokoista säiliötä, jolloin bioöljyn myynnin ja kuljetuksen laitokselta täytyy tapahtua tasaisemmin.

#### 5.5 Muu tarvittava laitteisto

Muu tarvittava laitteisto sisältää laitoksen automaation ja valvomon sen ohjaukseen, sekä tarvittavat kuljettimet raaka-aineen siirtoon ja putkiston pyrolyysiöljylle. Putkistolla tässä yhteydessä tarkoitetaan lähinnä putkistoa pyrolyysiyksikön ja bioöljyn säiliön sekä pyrolyysiyksikön ja kuivurin välillä.

Automaatiolla tarkoitetaan tuotannon automaattista käynnissä pitoa, jonka ohjaus ja valvonta tapahtuu siten, että inhimilliset päätökset ja suoritukset korvataan sähkömekaanisin laittein ja toiminnoin joita tietokone ohjaa. Oletetaan bioöljyn tuotantolaitos maksimaalisesti automatisoiduksi, jolloin säästetään henkilökustannuksissa. Tuotantolaitoksen yhteyteen rakennetaan valvomo, josta käsin prosessin toimintaa valvotaan.

Automaation lisäksi on tärkeää huomioida teolliset turvaratkaisut, joita myös tarvitaan. Näiden lisäksi on olemassa myös pitkälle meneviä prosessin

simulointi- ja optimointiratkaisuja sekä ylätasen IT-ratkaisuja, joiden soveltamista voi harkita osana RTP-laitosta. [Liukko, 20.12.2010]

Kuljettimet ovat materiaalin siirtoon tarkoitettuja koneita, joiden voimanlähteenä on sähkömoottori. Bioöljyn tuotantolaitoksella kuljettimia tarvitaan lähinnä prosessin osien välillä siirtämään raaka-ainetta eteenpäin. Tarvittavat kuljettimet ovat hihnakuljettimia, joilla raaka-aine mekaanisesti siirtyy automaattisesti prosessin osasta toiseen.

## 6. LAITOKSEN KUSTANNUKSET

Laitoskustannuksia on lähdetty kokoamaan 100 BDMTPD bioöljyn erillistuotantolaitoksen kustannuksista käsin. Lisäksi työn tavoitteeksi oli asetettu selvittää 400 BDMTPD laitoksen ja molemmissa kokoluokissa myös integroituna laitoksena toteutetun laitoksen kokonaiskustannukset. Kokoluokan kasvusta ja integroituna laitoksena toteutettuna tuotantolaitokseen liittyviä muutoksia laitoskustannuksiin on tarkasteltu samassa yhteydessä. Kaikkien laitosten laskennassa käytetyt alkuarvot on kasattu taulukkoon 14.

Integroitujen laitosten on oletettu saavan tarvitsemansa raaka-aineen edullisemmin ja hyödyntävän olemassa olevia tiloja ja järjestelmiä. Tässä yhteydessä integroidun laitoksen ajatellaan yhdistyvän osaksi suurta vaneritehdasta tai paperitehdas integraattia.

### 6.1 Investointikustannukset

Bioöljyn tuotantolaitoksen investointikustannusten pääkustannuskomponentit ovat pyrolyysiyksikkö, haketin, kuivuri ja bioöljyn varastosäiliö. Tämän lisäksi investointeja aiheutuu raaka-aineen vastaanottolaitteista ja tilantarpeesta, sähköistyksestä, automaatiosta ja valvomosta, tarvittavista kuljetuslaitteista putkistosta sekä muista pienemmistä kustannuskomponenteista. Investointikustannukset on selvitetty 100 BDMTPD erillistuotantolaitoksen osalta, johon muiden laitosvaihtoehtojen kustannuksia peilataan. Suuremman (400 BDMTPD) laitoksen osalta tunnetaan pyrolyysiyksikön investointikustannus ja hakettimen ja kuivurin kustannusten on arvioitu olevan kaksi kertaa suuremmat kapasiteetin nousun myötä.

Bioöljyn tuotantolaitoksen keskeisin komponentti on pyrolyysiyksikkö, joka sisältää kaasutusreaktorin, syklonin ja kondensaattorin. Pyrolyysiyksikkö on kokonaisinvestoinnin merkittävin kustannuskomponentti. Työssä tarkastellun pienemmän pyrolyysiyksikön (100 BDMTPD) investointikustannus on 20

miljoonaa dollaria ja suuremman (400 BDMTPD) 35 miljoonaa dollaria. [Liukko, 23.9.2010] Kustannusarviot on annettu +/- 40 % tarkkuudella. Annettu kustannushaarukka on huomattavan laaja, koska kunkin yksittäisen pyrolyysilaitoksen lopullinen toteutussuunnitelma ja investointikustannus riippuu asiakaskohtaisista tavoitteista, kuten käytettävästä biomassasta, tavoiteltavasta pyrolyysiöljyn loppulaadusta ja käyttökohteesta. [Liukko, 28.12.2010] Käyttäen päivän valuuttakurssia [valuutat.fi, 13.12.2010] saadaan pyrolyysiyksiköiden investointikustannuksiksi 15 078 000 € ja 26 390 000 €.

Hakettimen myyntihinta on pienimmille kiekkohakkureille (pelkkä hakku) ilman sähkömoottoria on noin 500 000 €. Tarvittava sähkömoottori on noin 500 kW. Moottorin koko määräytyy hakettavan pöllin maksimihalkaisijan mukaan. Pienimmillään koko linjan investointikustannus voisi olla luokkaa 1,5 M€ / haketuslinja. [Kahilahti, 20-21.10.2010] Murskaimen hinnan voidaan arvioida olevan samaa luokkaa.

Muita kustannusyksiköitä ovat biomassan kuivuri, pyrolyysiöljyn varastosäiliö, raaka-aineen vastaanottokenttä ja kuljetinlaitteistot sekä muut investointikustannukset. Kuivurin investointikustannus on noin 700 000 – 800 000 € sisältäen automaation ja kuljettimet, ja sähkönkulutus maksimikapasiteetilla noin 30 kW. [Rasimus, 1.11.2010] Terästorni Oy:n tarjous 500 m<sup>3</sup> pyrolyysiöljysäiliöstä on 130 000 € (alv. 0%) valmistettuna, tarkastettuna ja asennettuna Savonlinnassa. [Vilhu, 16.11.2010] Pyrolyysisäiliön hinta veron kanssa on siis noin 160 000 €. Raaka-aineen vastaanottoilojen kustannuksiin kuuluu varastosäiliö ja kuormaaja, joiden investointikustannukseksi on arvioitu 300 000 €. Kentän perustamiskustannukset kuuluvat yhteisiin kustannuksiin. Yksikkökustannukset 100 BDMTPD laitokselle on esitetty taulukossa 11.

**Taulukko 11:** Bioöljyn tuotantolaitoksen yksiköiden investointikustannukset 100 BDMTPD erillistuotantolaitokselle

Vaihe	100 BDMTPD erillistuotantolaitos [€]
Pyrolyysiyksikkö	15 102 000
Haketin	1 500 000
Kuivuri	800 000
Raaka-aineen vastaanotto	300 000
Tuotteen varastointi	200 000
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>17 902 000</b>

Koko laitoksen yhteiset investointi- ja järjestelmäkustannukset arvioidaan Metsä-Botnian Kaskinen-projektin voimalaitoksen investointikustannusten jakautumisen mukaan. Kun tiedetään koneiden ja laitteiden edustavan noin 70 % kokonaisinvestoinnista, niin jakautuvat loput 30 % rakennustöille, sähköistykselle, automaatiolle, LVI:lle, putkistolle ja varaosille prosentuaalisesti alla esitetyn taulukon 12 mukaisesti.

**Taulukko 12:** 100 BDMTPD erillistuotantolaitoksen yhteisten kustannusten arviot

	[%]	[€]
Rakennustyöt	8,8	2 179 000
Putkisto	4,6	1 389 000
Sähköistys	8,7	2 225 000
Automaatio	6,9	299 000
LVI	1,2	1 135 000
Varaosat	1,8	445 000
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>30</b>	<b>7 672 000</b>

## 6.2 Muuttuvat kustannukset

Muuttuvat kustannukset ovat kustannuksia, joiden määrä riippuu tuotannon tai toiminnan määrästä. Pyrolyysiöljyn tuotantolaitoksen muuttuvista kustannuksista merkittävin on raaka-aine, jonka käyttömäärä ja ennen kaikkea hinta vaikuttavat kannattavuuteen. Muita merkittäviä muuttuvia kuluja ovat palkkakustannukset, jotka kuitenkin ovat maksimaalisen automaation johdosta

kohtuulliset, ja huolto- ja kunnossapitokulut, joiden määräksi on arvioitu teollisen keskiarvon mukaisesti 3 % pääomakustannuksista.

Raaka-aineeksi erillistuotantolaitokselle on laskennassa oletettu kokopuuhaake, jonka käyttöpaikkahinta on 18 €/MWh. Tällöin pienemmän (100 BDMTPD) erillistuotantolaitoksen raaka-ainekulu on noin 2,8 M€/a ja suuremman (400 BDMTPD) noin 11,0 M€/a. Integroitujen laitosten on oletettu tulevaisuudessa saavan kaiken tarvitsemansa raaka-aineen emolaitoksen sivuainevirtana, jolloin raaka-aineen hinnaksi on arvioitu 10 – 13 €/MWh.

Laitoksen sähkönkulutus muodostuu pääosin tuotantolinjan eri yksiköiden kulutuksen summasta, johon lisätään valaistuksen ja automaation osuus. Kulutuksen arviointi on tehty yhdessä ohjausryhmän kanssa ja on noin 2 MW pienemmälle ja 4 MW suuremmalle laitokselle. Kun oletetaan laitoksen olevan käytössä 330 päivää vuodessa ja 24 tuntia päivässä ja teollisuuden maksamaksi sähkön hinnaksi 6,47 c/kWh [Energiateollisuus, 8.11.2010], saadaan sähkönkulutukselle vuosittainen hinta joka on noin 1 M€ pienemmälle ja 2 M€ suuremmalle laitokselle.

Laitoksen suurin lämmönkuluttaja kuivuri, jonka lämmöntarve on noin 135 GJ päivässä pienemmällä laitoksella, kun oletetaan kuivattavan raaka-aineen tulevan 35 % ja poistuvan alle 8 % kosteudessa ja tarvittavan lämpömäärän ollessa 2,8 – 3 MJ/kg haihdutettavaa vettä. [Vakkilainen, 1.11.2010] Tarvittava lämpö kuivauskaasuun saadaan kuitenkin pyrolyysiyksiköstä, joten laitoksen ulkopuolista lämpöenergiaa ei tarvitse hankkia. Tilojen lämmityksen voidaan olettaa olevan passiivista lämmönsiirtymistä kuumista laitteista sisäilmaan.

Palkkakustannukset ovat usein suuri menoerä tuotantoteollisuudessa. Bioöljyn tuotantolaitos on pyritty automatisoimaan mahdollisimman tehokkaasti, jolloin henkilökustannukset on saatu minimiin. Arvioidaan laitoksen tarvitsevan jatkuvasti 2 henkilöä paikan päällä; toinen prosessin valvonnassa ja toinen raaka-aineen vastaanotossa. Tällöin tarvitaan yhteensä 10 henkilöä, jotka työskentelevät kolmessa vuorossa. Kun oletetaan palkkakustannusten

sosiaalikulujen yms. kanssa olevan 70 000 €/a, saadaan kokonaishenkilökustannuksiksi 700 000 €/a.

**Taulukko 13:** 100 BDMTPD erillistuotantolaitoksen muuttuvat kustannukset

<b>Muuttuvat kulut:</b>	<b>[€]</b>
Raaka-aine	2 755 100
Henkilökustannukset	700 000
Sähkö	1 079 196
Käyttö ja kunnossapito	766 200
Muut	200 000
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>5 500 496</b>

## **7. BIOÖLJYN TUOTANTOLAITOKSEN KANNATTAVUUSTARKASTELU**

Merkittävimmät kannattavuuteen vaikuttavat tekijät ovat pyrolyysiyksikön investointikustannus, tarvittavan raaka-aineen hinta ja tuotantokapasiteetti. Mitä suurempi on tuotantolaitoksen kapasiteetti, sitä vähemmän tuotettuun yksikköön kohdistuu kuluja. Lisäksi merkittävässä roolissa on laskennassa käytetty korkokanta. Tässä työssä on korkokantana käytetty viittä prosenttia.

### **7.1 Investoinnin kannattavuuden arviointi**

Investointien kannattavuuden arviointiin on useita eri menetelmiä, kuten nykyarvomenetelmä, annuiteettimenetelmä, sisäisen korkokannan menetelmä ja takaisinmaksuajan menetelmä. Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnin tuotot ja kustannukset diskontataan nykyhetkeen valittua korkokantaa käyttäen. Menetelmän mukaan investointi on kannattava, kun nykyarvo on positiivinen. Annuiteettimenetelmässä investoinnin hankintameno jaetaan pitoaikaa vastaaville vuosille yhtä suuriksi pääomakustannuksiksi, jotka muodostuvat poistoista ja käytettävän korkokannan mukaisista korkokustannuksista. Investointiin ryhtyminen on taloudellisesti edullista, jos vuotuiset nettotulot ovat vähintään yhtä suuret tai suuremmat kuin vuotuiset pääomakustannukset. Sisäinen korkokanta osoittaa sen korkokannan, jolla investoinnin netto nykyarvo on nolla, jolloin investoinnista kertyvien nettotuottojen nykyarvo on yhtä suuri kuin peruskustannukset. Investointia voidaan siis pitää edullisena, jos sen sisäinen korkokanta on vähintään tavoitteeksi asetetun pääoman tuottoprosentin suuruinen. Takaisinmaksuajan menetelmässä selvitetään, minkä ajan kuluessa investoinnin nettotuotot ylittävät perushankintakustannukset. Menetelmän mukaan ne investoinnit kannattaa suorittaa, joissa pääoma kertyy nopeasti takaisin. [Uusi-Rauva et al., 2003, 167-173]

Kannattavuuden arviointiin on tässä työssä valittu käytettäväksi kaksi eri menetelmää; annuiteettimenetelmä sekä koroton ja korollinen

takaisinmaksuajanmenetelmä. Käytettyjen alkuarvojen ja oletusten, sekä laskettujen tulosten perusteella arvioidaan bioöljyn kullekin neljälle tuotantolaitosvaihtoehdolle kokonaiskannattavuus.

## 7.2 Käytetyt alkuarvot ja oletukset

Investointikustannuksissa ja laskennassa on jouduttu tekemään useita oletuksia. Integroitujen laitosten on oletettu saavan polttoaineensa halvemmalla hinnalla (10 €/MWh) ja koko tuotantolaitoksen yhteisten investointikustannusten (automaatio, sähköistys, jne.) olevan 20 % matalammat kuin erillistuotantolaitoksilla. Korkokantana on käytetty maltillista viittä prosenttia syksyn 2010 korkotilanteen mukaan. Laskennassa käytetyt oletukset on esitetty alla taulukossa 14.

**Taulukko 14:** Laskennassa käytetyt oletukset ja lähtöarvot

Oletukset:	Yksikkö	Arvo
Investointituki	[%]	20
Laskentakorkokanta	[%]	5
Pyrolyysiöljyn lämpöarvo	[MJ/kg]	18
Tuotantohyötysuhde	[%]	70
Kapasiteettihyötysuhde	[%]	93
Laitoksen pitoaika	[a]	25
Käyttöpäiviä	[d/a]	330

Tärkeimmät laitosten väliset erot ovat tuotantokapasiteetti, investointikustannus ja raaka-aineen hinta, jotka on esitetty taulukossa 15. Näiden lisäksi eroja aiheuttavat muut muuttuvat kustannukset, jotka integroiduilla laitoksilla ovat pienemmät kuin erillistuotantolaitoksilla. Kokonaisinvestoinnissa on otettu huomioon TEM:n (Työ- ja Elinkeinoministeriö) 20 % investointituki.

**Taulukko 15:** Laskennassa käytettyjä alkuarvoja

	Yksikkö	100 BDMTPD erillistuotantolaitos	100 BDMTPD integroitu	400 BDMTPD erillistuotantolaitos	400 BDMTPD integroitu laitos
Pyrolyysiöljyn tuotanto	[t/a]	21 429	21 429	85 714	85 714
Kokonaisinvestointi	[M€]	20,4	16,3	35,8	28,7
Raaka-aineen hinta	[€/MWh]	18	10	18	10

## 7.3 Laskenta

### 7.3.1 Pyrolyysiöljyn omakustannushinta

Pyrolyysiöljyn omakustannushinta saadaan summaamalla tuotannon pääomakulut, polttoaine (raaka-aine) kulut ja muut muuttuvat kulut muodossa €/MWh. Lasketaan investointikustannus  $I$ , joka on pääomakustannusten summa ja voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$I = K_v + K_h + K_k + K_p + K_s + K_{yht}, \quad (1)$$

jossa  $K_v$  on raaka-aineen vastaanotto [€]

$K_h$  on haketinvaihe [€]

$K_k$  on kuivurivaihe [€]

$K_p$  on pyrolyysiyksikkö [€]

$K_s$  on pyrolyysiöljyn varastointi [€]

$K_{yht}$  on koko tuotantolaitoksen yhteiset investointikustannukset [€]

Pyrolyysiöljyn tuotantolaitoksen koko prosessin yhteisiä kustannuksia  $K_{yht}$  ovat muut kuin laite- ja koneinvestoinnit, eli rakennustyöt, sähköistys, automaatio, LVI, putkisto ja varaosat. Nämä on arvioitu referenssilaitoksen avulla prosentuaalisesti. Ne edustavat yhteensä noin 30 prosenttia kokonaisinvestoinnista.

Pyrolyysiöljyn tuotannon pääomakulut  $C_p$  (€/MWh) lasketaan kaavalla 2. Kaavassa käytetty annuiteettitekijä  $c_{n/i}$  esitetään kaavassa 9.

$$C_p = \frac{I \cdot c_{n/i}}{T \cdot M}, \quad (2)$$

jossa  $T$  on bioöljyn vuosituotanto [t]  
 $M$  on muuntokerroin [MWh/t]

Pyrolyysiöljyn vuosituotanto  $T$  voidaan laskea kaavalla:

$$T = \frac{t \cdot d}{\eta_c}, \quad (3)$$

jossa  $t$  on laitoksen päiväkapasiteetti [t]  
 $d$  on käyttöpäivien määrä vuodessa [d/a]  
 $\eta_c$  on kapasiteettihyötysuhde [%]

Muuntokerroin  $m$  saadaan jakamalla tuotetun pyrolyysiöljyn lämpöarvo (MJ/kg) 3,6:lla:

$$m = \frac{q}{3,6}, \quad (4)$$

jossa  $q$  on pyrolyysiöljyn lämpöarvo [MJ/kg]

Kun tiedetään raaka-aineen hinta (€/MWh) ja tuotantohyötysuhde, voidaan polttoainekulut  $C_{pa}$  laskea kaavasta:

$$C_{pa} = \frac{C_{ra}}{\eta_t}, \quad (5)$$

jossa  $C_{ra}$  on raaka-aineen hinta [€/MWh]

$\eta_t$  on tuotantohyötysuhde [%]

Muut muuttuvat kulut  $C_{kk}$  (€/MWh) sisältävät henkilökustannukset, sähkökustannukset, huolto- ja kunnossapitokulut, jotka teollisen keskiarvon mukaan voidaan arvioida olevan 3% investointikustannuksista, ja muut mahdolliset kulut. Ne voidaan laskea kaavasta:

$$C_{kk} = \frac{K_{hk} + K_{sä} + K_{mahd} + I \cdot 0,03}{M} \cdot T, \quad (6)$$

jossa  $K_{hk}$  on henkilökustannukset [€/a]

$K_{sä}$  on sähkökustannukset [€/a]

$K_{mahd}$  on muut mahdolliset kustannukset [€/a]

Pyrolyysiöljyn omakustannushinta  $C$  lasketaan summaamalla pääomakulut, polttoainekulut ja muut muuttuvat kulut:

$$C = C_p + C_{pa} + C_{kk} \quad (7)$$

### 7.3.2 Annuiteettimenetelmä

Laitoksen nettotuotto (€/a) saadaan suoraan vähentämällä raskaan polttoöljyn markkinahinnasta pyrolyysiöljyn omakustannushinta ja kertomalla erotus pyrolyysiöljyn vuosituotannolla ja muuntokertoimella:

$$N = (H - C) \cdot T \cdot M, \quad (8)$$

jossa  $N$  on vuotuinen nettotuotto [€/a]

$H$  on raskaan polttoöljyn markkinahinta [€/MWh]

Annuiteettitekijä  $c_{n/i}$  lasketaan kaavalla:

$$c_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (9)$$

jossa  $n$  on laitoksen pitoaika [a]  
 $i$  on laskentakorkokanta [%]

Annuiteettimenetelmän mukaan investointi on kannattava, jos vuotuinen nettotuotto on suurempi kuin perustuotantokustannusten annuiteetti:

$$N - c_{n/i} \cdot P > 0, \quad (10)$$

jossa  $P$  on perushankintakustannus (=investointikustannus)

### 7.3.3 Koroton ja korollinen takaisinmaksuaika

Pyrolyysiöljyn tuotantolaitoksen koroton takaisinmaksu aika  $a_a$  saadaan jakamalla vuotuinen nettotuotto investointikustannuksilla:

$$a_a = \frac{N}{I}, \quad (11)$$

jossa  $a_a$  on koroton takaisinmaksuaika

Todellisempi korollinen takaisinmaksuaika  $a_b$  saadaan seuraavasta kaavasta:

$$a_b = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{I}{N}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} \quad (12)$$

## 7.4 Tulokset

Pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuus on laskettu neljässä eri tapauksessa. Kokoluokkina ovat 100 BDMTPD ja 400 BDMTPD laitokset, joille on laskettu erillislaitostuotantohinta ja integroidun laitoksen tuotantohinta. Koska pyrolyysiöljy kilpailee lähinnä raskaanpolttoöljyn kanssa, on sen tuotannon kannattavuutta verrattu raskaan polttoöljyn markkinahintaan, joka samalla määrittää hintakaton (ja hinnan) pyrolyysiöljylle. Raskaan polttoöljyn hinta on 585 €/t, eli 51,3 €/MWh [Öljy- ja kaasualan keskusliitto, 2010:09,]. Verrattaessa pyrolyysiöljyn tuotantokustannusta raskaan polttoöljyn hintaan muodossa €/t täytyy huomioida suuri ero lämpöarvossa, jolloin pyrolyysiöljyn tuotantohinta ei saa olla yli 265,9 €/t, kun käytetään karkeasti lämpöarvojen suhteena arvoa 2,2. Alla taulukossa 16 on esitetty lasketut tulokset eri laitoksille.

**Taulukko 16:** Pyrolyysiöljyn tuotantolaitosten omakustannushinnat ja nettotuotot

	Yksikkö	100 BDMTPD erillistuotanto	100 BDMTPD Integroitu	400 BDMTPD erillistuotanto	400 BDMTPD Integroitu
Omakustannushinta	[€/MWh]	64,9	49,3	41,9	28,7
Vuotuinen nettotuotto	[M€/a]	-1,5	0,2	4,0	9,7

Pyrolyysiöljyn tuottaminen 100 BDMTPD laitoksilla on suhteellisen kallista johtuen pienestä kapasiteetista, jolloin yksikkökustannukset ovat korkeat. 400 BDMTPD laitoksilla omakustannushinnat ovat huomattavasti raskaanpolttoöljyn markkinahintaa matalammat, jolloin vuotuinen nettotuotto on selvästi positiivinen. Tarkastellaan seuraavaksi kannattavuustarkasteluiden tuloksia, jotka on esitetty taulukossa 17.

**Taulukko 17:** Annuiteettimenetelmän mukaiset pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuudet ja tuotantolaitoksen korottomat ja korolliset takaisinmaksuajat

Kannattavuus	100 BDMTPD erillistuotantolaitos	100 BDMTPD integroitu laitos	400 BDMTPD erillistuotantolaitos	400 BDMTPD integroitu laitos
Annuiteettimenetelmän mukaan	Neg	Neg	Pos	Pos
Koroton takaisinmaksuaika [a]	-	76,4	8,9	3,0
Korollinen takaisinmaksuaika [a]	-	-	12,1	3,3

Annuiteettimenetelmällä lasketut tulokset osoittavat 100 BDMTPD tuotantolaitosten olevan kannattamattomia investointeja. Korollisia takaisinmaksuaikoja tarkastellessa laitokset eivät maksa itseään takaisin ollenkaan.

Molemmat 400 BDMTPD laitokset vaikuttavat annuiteettimenetelmän mukaan olevan kannattavia investointeja käytetyillä alkuarvoilla. Takaisinmaksuajat erillistuotantolaitoksella ovat energiainvestoinnille kohtuulliset, integroidulla laitoksella erinomaiset olettaen, että raaka-aine saadaan edullisesti.

## 7.5 Tukien ja päästökaupan vaikutus

Pyrolyysiöljyn tuotanto kuuluu uusiutuvan energiatuen piiriin ja sitä kohdellaan verottomana polttoaineena. Itse tuotannolle ei ole olemassa tukea, mutta investointitukea on saatavissa maksimissaan 40 % kokonaisinvestoinnista. [Saarinen, 8.10.2010] Realistisesti arvioiden laskennassa on käytetty 20 % investointitukea pääomakustannuksille.

Päästökaupan vaikutusta vertailukohtana käytetyn raskaan polttoöljyn hintaan ei ole käytetty laskennassa, mutta sen vaikutusta tarkastellaan herkkyysanalyysissä. Päästökauppalaain (683/2004) 4 §:n mukaan samassa kaukolämpöverkossa päästökauppaan kuuluvien yli 20 MW voimalaitosten kanssa olevien alle 20W nimellisen lämpötehon laitokset ovat päästökaupan piirissä. Päästökauppa koskee myös metsäteollisuuden laitoksia, kuten

meesauuneja. [Finlex] Päästökauppalakia on myöhemmin muutettu toista päästökauppakautta varten laeilla 108/2007 ja 1468/2007. [Energiateollisuus Ry, 12.12.2010]

Päästöoikeuksien myyntituotot voidaan laskea kertomalla hiilidioksidipäästöt päästöoikeuden hinnalla. Fossiilisen polttoaineen, kuten raskaan polttoöljyn, poltossa syntyneen hiilidioksidipäästöt  $m_{CO_2}$  saadaan yhtälöstä:

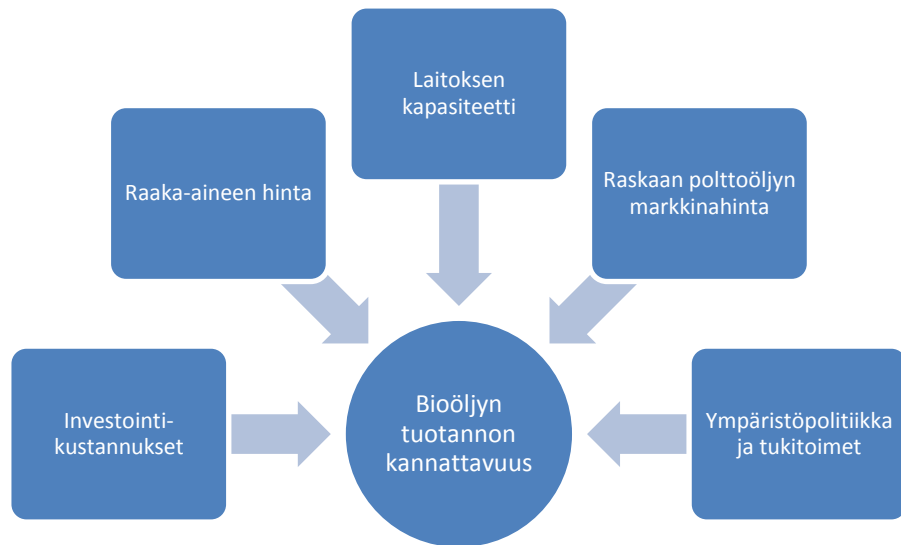
$$m_{CO_2} = m_{rpö} \cdot q_{i,rpö} \cdot k_{CO_2}, \quad (13)$$

jossa  $m_{rpö}$  on raskaan polttoöljyn kulutus  
 $q_{i,rpö}$  on raskaan polttoöljyn tehollinen lämpöarvo  
 $k_{CO_2}$  on raskaan polttoöljyn päästökerroin

Raskaalle polttoöljyn käytöstä aiheutuu siis lisäkustannuksia päästökaupan piiriin kuuluvissa laitoksissa. Raskaalle polttoöljylle hiilidioksidipäästöt energiaa kohden ovat 77,4 t<sub>CO2</sub>/TJ (278,6 kg<sub>CO2</sub>/MWh<sub>rpö</sub>). [Tilastokeskus, Polttoaineluokitus ja päästökertoimet, 2005] Mikäli oletetaan päästöoikeuden hinnaksi vuoden 2010 alun 15 €/t<sub>CO2</sub> [Sillanpää, 2010], saadaan päästökaupan aiheuttamaksi lisäkustannukseksi raskaan polttoöljyn hintaan noin 4,2 €/MWh.

## 7.6 Herkkyystarkastelu

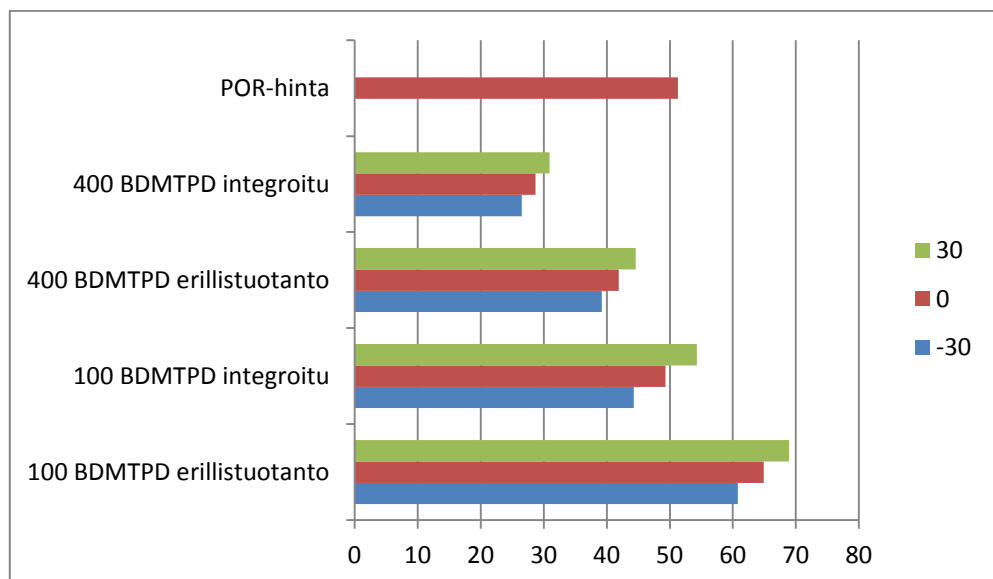
Pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen vaikuttavat useat eri tekijät, joista merkittävimmät on esitetty alla kuvassa 10. Näiden muuttujien merkitykseen ja vaikutukseen on tarkemmin paneuduttu tarkasteluskenaarioissa. Tämän lisäksi laskennassa kannattavuuteen vaikuttaa korkotaso, tuotetun pyrolyysiöljyn ominaisuudet, kuten lämpöarvo, ja muutokset muissa muuttuvissa kuluissa (henkilökustannukset, sähkö, jne.). Kapasiteetti on muuttujista ainut kiinteä arvo, jota ei pysty muuttamaan.



**Kuva 10:** Pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen merkittävimmin vaikuttavat tekijät

### 7.6.1 Investointikustannukset

Investointikustannusten suuruus vaikuttaa suuresti tuotetun pyrolyysiöljyn omakustannushintaan. Koska esimerkiksi pyrolyysiyksikön investointikustannus on annettu laajalla +/- 40 prosentin tarkkuudella, voi kokonaisinvestoinnin suuruusluokka vaihdella merkittävästi. Tarkastellaan bioöljyn tuotannon kannattavuutta tuotantolaitoksilla kokonaisinvestointi kustannusten muuttuessa +/- 30 %.

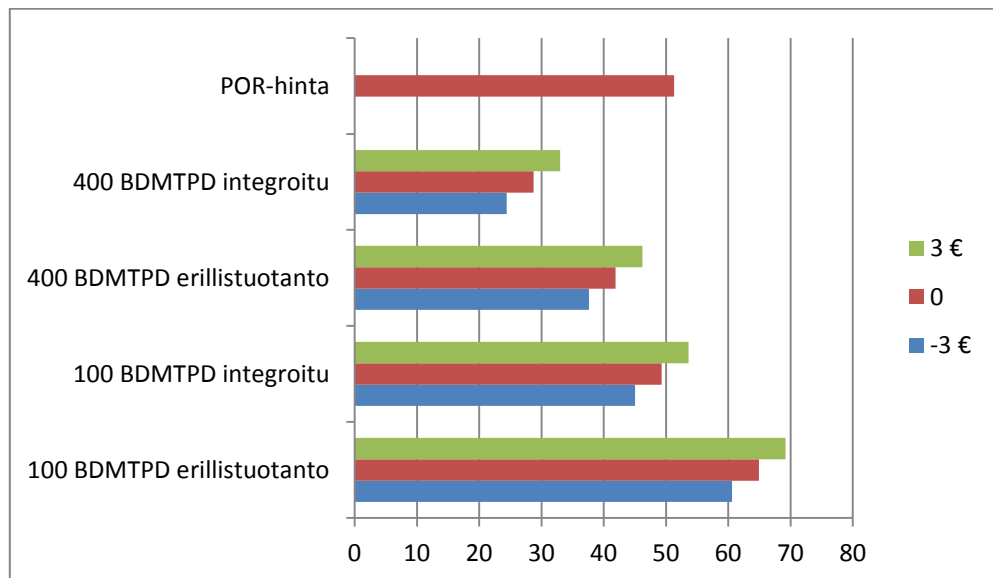


**Kuva 11:** Investointikustannusten vaikutus pyrolyysiöljyn omakustannushintaan (€/MWh)

30 prosentin muutos investointikustannuksissa ei tee 100 BDMTPD laitoksista kannattavia. 400 tpd erillistuotantolaitoksella -30 % tiputtaa korollisen takaisinmaksuajan 5,7 vuoteen, +30 % nostaa sen 35 vuoteen. Integroidulla laitoksella vastaavat korolliset takaisinmaksuajat ovat 2 ja 5 vuotta.

### 7.6.2 Raaka-aineen hinta

Raaka-ainekulut ovat pyrolyysiöljyn tuotantolaitoksen merkittävin muuttuva kulu ja ne kasvavat sitä suuremmaksi, mitä suurempia ovat laitosten kapasiteetit. Koska eri biomassojen hinnat eroavat huomattavasti toisistaan (kappale 3.1.5), tarkastellaan niiden vaikutusta tuotetun pyrolyysiöljyn omakustannushintaan hinnan muuttuessa +/- 3 €/MWh. Tällöin erillistuotantolaitosten raaka-aineiden hintoina käytetään 15 ja 21 €/MWh, ja integroitujen tuotantolaitosten raaka-aineen hintoina 7 ja 13 €/MWh.



**Kuva 12:** Raaka-ainekustannusten muutoksen vaikutus tuotetun pyrolyysiöljyn omakustannushintaan (€/MWh)

Raaka-ainekustannusten 3 €/MWh muutos ei tee 100 BDMTPD tuotantolaitoksista kannattavia. 400 BDMTPD tuotantolaitokset ovat

annuiteettimenetelmän mukaan kannattavia, vaikka raaka-aine kallistuisi 3 €/MWh, jolloin oltaisiin raaka-aineen osalta kuitupuun hinnassa erillistuotantolaitoksella. Tällöin tosin erillistuotantolaitoksen korollinen takaisinmaksuaika kasvaisi 35 vuoteen. Integroidulla laitoksella raaka-aineen hinnan nousu 13:een €/MWh kasvattaisi korollisen maksuajan vain 4,1 vuoteen.

### 7.6.3 Raskaanpolttoöljyn markkinahinta

Raskaan polttoöljyn hinta oli tarkasteluhetkellä 51,3 €/MWh, joka määrittäi tuotetulle pyrolyysiöljylle korkeimman markkinahinnan. Öljyn hinta on pitkällä tähtäimellä kuitenkin selvästi nousujohteinen, joten tarkastellaan laitosten kannattavuutta raskaan polttoöljyn hinnan ollessa 70 €/MWh (800 €/t).

**Taulukko 18:** pyrolyysiöljyn tuotantolaitosten kannattavuus raskaan polttoöljyn hinnan ollessa 70 €/MWh

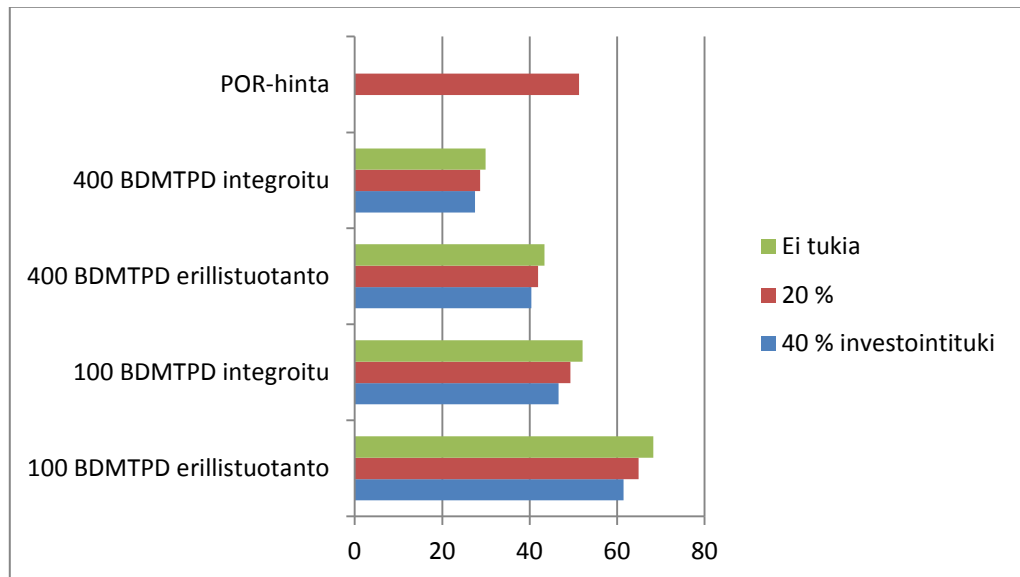
Tuotantolaitos	Annuiteetti	Korollinen takaisinmaksuaika	Nettotuotto [M€/a]
100 BDMTPD erillistuotanto	Neg	-	0,5
100 BDMTPD integroitu	Pos	9,4	2,2
400 BDMTPD erillistuotanto	Pos	3,3	12
400 BDMTPD integroitu	Pos	1,7	17,7

Raskaan polttoöljyn hinnan nousulla on merkittävä vaikutus pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen. Raskaan polttoöljyn markkinahinnalla 70 €/MWh 100 BDMTPD integroidusta laitoksesta tulee kannattava. 100 BDMTPD erillistuotantolaitos jää kuitenkin edelleen kannattamattomaksi. 400 BDMTPD tuotantolaitoksista tulee erittäin kannattavia.

### 7.6.4 Ympäristöpolitiikka ja tukitoimet

Pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen vaikuttaa suuresti poliittiset päätökset ja tukitoimet. Biopolttoaineen käytön imagoarvoa on hyvin vaikea arvioida

taloudellisesti, mutta tukitoimien vaikutusta kannattavuuteen voidaan arvioida. Tarkastellaan laskennassa käytetyn TEM:n investointituen (20 %) muutoksen vaikutusta pyrolyysiöljyn tuotannon kannattavuuteen kahdessa skenaariossa; ei tukitoimia ja 40 % investointituki.



**Kuva 13:** Investointituen vaikutus pyrolyysiöljyn omakustannushintaan (€/MWh)

Investointituen kasvattaminen 40 prosenttiin ei tee 100 BDMTPD laitoksista kannattavia. 400 BDMTPD integroitu laitos on kannattava annuiteettimenetelmän mukaan ilman investointitukeakin korollisen takaisinmaksuajan ollessa vain 4,4 vuotta. 400 tpd erillistuotantolaitoksen takaisinmaksu aika karkaa yli 22 vuoteen ilman investointitukea.

## 8. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Nopeaan pyrolyysiin perustuvan bioöljyn tuotantolaitoksen sijoittaminen Savonlinnan seudulle tuo alueelle työpaikkoja ja teknologiaosaamista. Suorat työllisyysvaikutukset ulottuvat itse laitoksen lisäksi koko biomassan hankintaketjuun. Bioöljyn tuotantolaitoksen raaka-aineen esikäsittelyvaiheen laitteet ja komponentit on mahdollista suunnitella ja toteuttaa alueen metalli- ja suunnitteluteollisuuden keskittyneissä firmoissa, jonka jälkeen kehitettyä teknologiaa voidaan viedä muualle. Konseptin toteutuessa osaamista on mahdollista myydä jatkossa ympäri maailmaa kohteisiin, missä on käytettävissä jalostamiseen soveltuvia potentiaalisia kiinteitä biojakeita, joiden jalostaminen bioöljyksi toisi uusia markkinoita.

Bioöljyn tuotantolaitoksen sijoittaminen Savonlinnan seudulle parantaa koko Etelä-Savon läänin energiaomavaraisuutta ja hiilidioksiditasetta sekä lisää alueen bioenergialiiketoimintaa. Samalla suojaudutaan osittain polttoöljyn hinnan nousua vastaan, mikä voi olla merkittävä etu tuotantoteollisuudessa. Tuotantolaitos on ensimmäinen laatuaan Euroopassa, joten pääomakustannukset ovat suuremmat kuin potentiaalisesti seuraavilla laitoksilla, mutta referenssilaitoksena se on tärkeä tulevalle bioenergiakehitykselle. Jatkossa pyrolyysiöljystä voi olla mahdollista tuottaa myös liikennepolttoaineita.

### 8.1 Yhteenveto

Pyrolyysiöljy, joka useimmiten tunnetaan bioöljynä, on orgaanisesta bioperäisestä raaka-aineesta valmistettua polttoainetta, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoöljyjä sekä lämmöntuotannossa että meesauuneissa. Pyrolyysiöljyn ominaisuudet poikkeavat huomattavasti fossiilisten polttoöljyjen ominaisuuksista. Fossiilisiin polttoöljyihin verrattuna merkittävimmät erot ovat alhainen lämpöarvo, suurempi kiintoainepitoisuus ja vesipitoisuus sekä pyrolyysiöljyn happamuus. Pyrolyysiöljyn käytön ongelmat ovat kuitenkin

ratkaistavissa oikeilla materiaali- ja polttratkaisuilla. Pyrolyysiöljyn käyttöönottoa on helpottanut vuonna 2009 julkaistu pyrolyysiöljyn standardi, joka määrittää pyrolyysiöljyn ominaisuuksille maksimi- ja minimiarvot.

Pyrolyysiöljy on loppukäyttäjille uusi tuote, eikä sillä ole vielä olemassa olevia markkinoita. Tätä varten kartoitettiin potentiaaliset alueelliset markkinat, joita edustavat lähinnä raskasta polttoöljyä seudulla käyttävät laitokset; meesauunit ja CHP – laitokset. Selvityksen valossa pyrolyysiöljyn tuotannolle vaikuttaisi olevan riittävästi markkinapotentiaalia. Alueen potentiaalisia käyttäjiä olivat lähinnä meesauunit ja yhteis- ja erillislämmöntuotantolaitokset, joissa yhteensä potentiaalia oli noin 550 000 tonnille pyrolyysiöljyä vuosittain.

Bioöljyn tuotantolaitos tarvitsee raaka-ainekseen biomassaa, jota varten kartoitettiin alueellinen raaka-aine potentiaali ja mahdollisesti käytettävissä olevat puunjalostusteollisuuden sivuainevirrat. Teollisuuden sivuainevirrat ovat tehokkaasti sidottu käyttöön muualle, mutta metsäenergiaa on riittävästi saatavilla lähinnä hakkeen ja energiarangan muodossa (1,25 milj. kiintokuutiometriä).

Ennen pyrolyysiprosessiin syöttöä biomassaa tulee esikäsitellä sopivaan palakokoon ja kosteuteen, jotta prosessi toimii optimaalisesti ja tuotettu pyrolyysiöljy täyttää laatuvaatimukset. Tätä varten pyrolyysiöljyn tuotantolaitokselle selvitettiin biomassan käsittelyyn soveltuvat laitteet ja järjestelmät sekä niiden investointikustannukset.

Laskelmissa pyrolyysiöljylle määritettiin hinnan raskaan polttoöljyn markkinahinta (51,3 €/MWh), jonka kanssa pyrolyysiöljy kilpailee. Bioöljyn tuotannon kannattavuuteen vaikuttivat merkittävimmin raskaan polttoöljyn markkinahinta, raaka-aineen hinta, investointikustannukset, laitoksen kapasiteetti sekä ympäristöpolitiikka ja tukitoimet. 100 BDMTPD laitokset eivät herkkyytarkastelun perusteella ole kannattavia investointeja, ellei raskaan polttoöljyn markkinahinta kasva merkittävästi, johtuen suurista yksikkökustannuksista. Laitosten bioöljyn omakustannushinnoiksi saatiin 64,9

€/MWh erillistuotannolle ja 49,3 €/MWh integroidulle. Laskelmissa ei otettu huomioon päästökaupan vaikutusta.

400 BDMTPD erillistuotantolaitoksen bioöljyn omakustannushinnaksi saatiin 41,9 €/MWh ja integroidulle laitokselle 28,7 €/MWh. Suuremmat tuotantolaitokset vaikuttavat kannattavilta investoinneilta lähes kaikissa herkkyytarkastelun skenaarioissa. Erillistuotantolaitoksen kannattavuus on tosin heikko, mikäli raaka-aineena joudutaan käyttämään kuitupuuta, tuotantolaitokselle ei myönnetä investointitukea tai investointikustannukset kasvavat merkittävästi. Integroitu tuotantolaitos on kannattava investointi kaikissa tapauksissa, johtuen pitkälti integraation mahdollistamasta laskennassa oletetusta matalasta raaka-aineen hinnasta.

## 8.2 Johtopäätökset

Bioöljyn jalostuslaitoksen prosessointivaihekokonaisuuksia valittaessa jouduttiin tekemään paljon oletuksia ja käyttämään karkeita arvioita haastattelutietojen perusteella, sekä arvioimaan kustannuksia osittain samantyyppisten laitosten kustannustietojen pohjalta. Bioöljyn tuotantolaitoksen laitteiden ja komponenttien investointikustannusten haarukka on investointivaiheelle tyypillisen laaja. Epävarmuutta aiheuttaa energiaverojen ja tukien sekä muiden poliittisten päätösten mahdolliset suuretkin muutokset ja metsäenergiajakeiden hintatietoihin liittyvä hinnan määrittelyn vaihtelevuus lähdetiedosta riippuen.

Laskelmien perusteella bioöljyn tuotannon kannattavuuteen vaikuttaa merkittävimmin raskaan polttoöljyn markkinahinta. Öljyn hinta on pitkällä aikavälillä ollut nousujohteista, ja sen voidaan olettaa jatkavan samaa linjaa tulevaisuudessakin fossiilisten polttoainevarojen vähetessä ja päästörajoitusten tiukentuessa, jolloin bioöljyn kannattavuus paranee. Toisaalta myös biomassojen hinnat ovat olleet nousujohteisia, mikä vaikuttaa negatiivisesti bioöljyn

tuotannon kannattavuuteen. Laskelmien perusteella suuremmat 400 BDMTPD tuotantolaitokset vaikuttavat kannattavilta investoinneilta, mikäli raaka-aine saadaan kohtuulliseen hintaan ja investointikustannukset saadaan pidettyä kurissa.

Pyrolyysiöljy on uusi tuote loppukuluttajille ja siihen suhtaudutaan toistaiseksi vielä varovaisesti. Euroopassa pyrolyysiöljyn käyttöä on demonstroitu pienessä mittakaavassa, mutta pidemmän aikavälin teollisen mittakaavan käyttöajot puuttuvat. Metsäteollisuus vaatii yli kuukauden täysmittaista pyrolyysiöljyn testausta meesauunissa, ennen kuin sen voidaan olettaa hyväksyvän pyrolyysiöljy polttoainevaihtoehdoksi. Toisaalta meesauuneissa on käytetty pitkään mäntyöljyä, joten pyrolyysiöljy tuskin aiheuttanee suuria ongelmia. Bioöljylle alueellisesti merkittävä potentiaalinen markkina on pienen-keskisuuren kokoluokan lämmityskattilat, jotka käyttävät raskasta tai kevyttä polttoöljyä pääpolttoaineena. Tämä fossiilisten polttoaineiden käyttö voitaisiin korvata uusiutuvalla polttoaineella eli pyrolyysiöljyllä, mikä tarkoittaisi vain pieniä teknisiä muutoksia olemassa oleviin nykyisiin polttoaineen käsittely- ja polttojärjestelmiin.

Laitoksen bioöljymarkkinoiden varmistamiseksi pitäisi alueellisella biojakeella valmistaa bioöljyä testattavaksi harkittavissa käyttökohteissa. Honeywellin Envergent yhtiöllä on Kanadassa 100 BDMTPD tuotantolaitos, mikä mahdollistaa bioöljyn kokeellisen tuotannon. Bioöljyn käyttäjättestaukset pitäisi suunnitella käyttötarpeen mukaan.

Tarkastelun perusteella suurempien 400 BDMTPD bioöljyn tuotantolaitosten jatkotutkimus on suositeltavaa. Jatkotutkimuksessa on syytä panostaa pyrolyysilaitokselle soveltuvien erilaisten biomassojen ja -jakeiden hankintaketjuihin sekä prosessointijärjestelmien selvittämiseen ja niiden optimointiin. Pyrolyysiöljyn tunnettavuutta loppukäyttäjien parissa on myös syytä parantaa, jotta kiinnostus pyrolyysiöljyä kohtaan kasvaisi ja mahdollisuutta polttoainevaihtoehdona osattaisiin huomioida.

## LÄHDELUETTELO

30.7.2004/683 Päästökauppalaki [verkkodokumentti]. [viitattu 10.11.2010]  
Saataavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20040683>

3.8.2006/689 Valtioneuvoston asetus raskaan polttoöljyn, kevyen polttoöljyn ja meriliikenteessä käytettävän kaasuöljyn rikkipitoisuuksista [verkkodokumentti]. [viitattu 25.10.2010]. Saataavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060689>

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [verkkodokumentti]. VTT Tiedotteita 2045. ISSN 1235-0605 [viitattu 25.20.2010]. Saataavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Asplund, D. Flyktman, M. & Uusi-Penttilä, P. 2009. Arvio mahdollisuuksista saavuttaa uusiutuvien energialähteiden käytön tavoitteet vuonna 2020 Suomessa [verkkodokumentti]. FinBio julkaisu 42. [viitattu 1.12.2010] Saataavissa: [www.finbio.fi](http://www.finbio.fi)

ASTM D7544 -09. 2009. Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. ASTM International.

Blin, J. Volle, G. Girard, P. Bridgwater, T. & Meier, D. 2007. Biodegradability of biomass pyrolysis oils: Comparison to conventional petroleum fuels and alternatives fuels in current use [verkkodokumentti]. Fuel. Vol. 86. pp. 2679-2686. [viitattu 1.11.2010] Saataavissa: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Badger, P. & Fransham, P. 2006. Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs - A preliminary assessment. Biomass and Bioenergy. Vol. 30. pp. 321-325.

Bradley, D. 2006. European Market Study for BioOil [verkkodokumentti]. Climate Change Solutions. National Team Leader – IEA Bioenergy Task 40-Bio-trade. [viitattu 1.10-20.12.2010] Saataavissa:  
[http://www.canbio.ca/documents/publications/European\\_BioOil\\_Market\\_Study\\_Dec\\_15\\_pdf.pdf](http://www.canbio.ca/documents/publications/European_BioOil_Market_Study_Dec_15_pdf.pdf)

Bridgwater, A. Meier, D. & Radlein, D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass [verkkodokumentti]. Organic Geochemistry. Vol. 30. pp. 1479-1493. [viitattu 10.9.2010]. Saataavissa: <http://envsus610.110mb.com/pyrolysis7.pdf>

Bridgwater, A. Toft, A. & Brammer, J. 2002. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion [verkkodokumentti]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 6. pp. 181-248. [viitattu 1.10.2010] Saataavissa:  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6VMY-4685JCX-](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VMY-4685JCX-)

1&\_user=10&\_coverDate=09%2F30%2F2002&\_rdoc=1&\_fmt=high&\_orig=search&\_origin=search&\_sort=d&\_docanchor=&view=c&\_searchStrId=1601695546&\_rerunOrigin=google&\_acct=C000050221&\_version=1&\_urlVersion=0&\_userid=10&md5=6e7f26abf648ef573b2a7e6075e6218f&searchtype=a

Bridgwater, A. 2004. Biomass Fast Pyrolysis. Review paper. BIBLID 0354-9836. Vol. 8. pp 21-49.

Chiaromonti, D., Oasmaa, A. and Solantausta, Y. 2005. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11 (2007), pp. 1056-1086

Conversion and Resource Evaluation. 2006. Transport, storage and handling of biomass derived fast pyrolysis liquids [verkkodokumentti]. [viitattu 1.10.2010] Saatavissa:  
<http://www.biochar.bioenergylists.org/files/TRANSPORT,%20STORAGE%20AND%20HANDLING%20OF%20BIOMASS%20DERIVED%20FAST%20PYROLYSIS%20LIQUIDS.pdf>

Diebold, J. Scahill, J. 1987. Production of primary pyrolysis oils in a vortex reactor. Production, Analysis and Upgrading of Oils from Biomass. ACS Series, Denver, Colorado. pp. 21-28

Diebold, J. 1997. A Review of the Toxicity of Biomass Pyrolysis Liquids Formed at Low Temperatures. NREL, Colorado, USA. Department of Energy.

Diebold, J. & Czernik, S. 1997. Additives to Lower and Stabilize the Viscosity of Pyrolysis Oils During Storage [verkkodokumentti]. Energy & Fuels. Vol. 11. pp. 1081-1091. DOI: 10.1021/ef9700339. Saatavissa:  
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef9700339>

Elliott, D. Baker, E. 1984. Upgrading Biomass Liquefaction Products through Hydrodeoxygenation. Biotechnol. Bioeng. Symp. Vol. 14. 159.

Elliott, D. & Baker, E. 1987. Hydrotreating biomass liquids to produce hydrocarbon fuels. Energy from Biomass and Waste X. Institute of Gas Technology, Chicago. pp. 765-784

Energianet.fi. Energiaverot nousevat 2011 [verkkodokumentti]. Julkaistu 27.08.2010. [viitattu 10.10.2010]. Saatavissa: <http://energianet.fi>

Energiapuu.fi. Kotisivu. [viitattu 12.12.2010] Saatavissa: [www.energiapuu.fi](http://www.energiapuu.fi)

Energiateollisuus ry. Päästökauppa [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2010] Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/ymparisto/paastokauppa>

Energiateollisuus ry. 2010. Kaukolämpötilasto 2009 [verkkodokumentti]. ISSN 0786-4809 [viitattu 1.11.2010]. Saatavissa:

[http://www.energia.fi/fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammitys/kaukolampo\\_tilasto\\_2009\\_pdf\\_web.pdf](http://www.energia.fi/fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammitys/kaukolampo_tilasto_2009_pdf_web.pdf)

Energiateollisuus. Teollisuussähkön (pien- ja keskisuuri) hinta [verkkodokumentti]. [viitattu 8.11.2010] Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/tilastot/sahkotilasto/hinnat/teollisuussahkonhintaeuroopassa>

Envergent Technologies. A Honeywell Company. Kotisivu. [viitattu 10.9.2010] Saatavissa: <http://www.envergenttech.com/rtp.php>

Gullichsen, J. & Fogelholm, C. J. 2000. Chemical Pulping 6B. Fapet Oy. ISBN 952-5216-06-3

Huffman, D., Vogiatzis, A., Clark, D. 1996. Combustion of Bio-Oil, in: Bio-Oil Production and Utilization (Eds. A. V. Bridgwater, E. Ho gan). CPL Press, Newbery, UK. pp 227-235.

Iisveden Metsä Oy. Kotisivu. [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: [www.iisveden.fi](http://www.iisveden.fi)

Immonen, P. 2010. Vaneritehtaan energianäkökohtien tarkastelu ja seuranta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energiatekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: LUT kirjasto

Kahilahti, M. Myyntipäällikkö. Andritz Oy. Henkilökohtaiset tiedonannot, sähköposti. 20-21.10.2010

Kaikkonen, P. Andritz Oy. Palaveri. 27.10.2010

Kähkönen, J. Käyttöpäällikkö. Botnia Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 11.10.2010

Laimet Oy. Kotisivu. [viitattu 5.11.2010] Saatavissa: [www.laimet.com](http://www.laimet.com)

Liukko, K. Senior Sales Consultant. Honeywell Process Solutions. Henkilökohtaiset tiedonannot, sähköpostit ja puhelinkeskustelut. 1.9.2010 - 4.1.2011

Lu, Q., Li W. & Zhu, X., 2009. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. Energy Conversion and Management. Vol. 50(5). pp 1376-1383.

Metsäkeskus. Kotisivu. [viitattu 12.12.2010] Saatavissa: [www.metsakeskus.fi](http://www.metsakeskus.fi)

Metsänhoitoyhdistys. Puumarkkinakatsaus. 21.12.2010. [viitattu 4.1.2011] Saatavissa: <http://www.mhy.fi/mhy/puumarkkinat/>

Metsänomistajien liitto. Puumarkkinakatsaus Joulukuu 2010. [viitattu 4.1.2011] Saatavissa: <http://www.mhy.fi/keskipohjanmaa/puumarkkinat>

Neste Oil. Raskas Polttoöljy LS 420, tuotetiedote 1.1.2010 [verkkodokumentti]. [viitattu 25.10.2010] Saatavissa: [http://www.neste.fi/doc/170380\\_fi.pdf](http://www.neste.fi/doc/170380_fi.pdf)

Nousiainen, M. Senior Manager. UPM-Kymmene. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 21.10.2010

Oasmaa, A. Leppimäki, E. Koponen, P. Levander, J. & Tapola, E. 1997. Physical characterisation of biomass-based pyrolysis liquids: Application of standard fuel oil analyses. ISSN 1235-0621. VTT Tiedotteita 306. Espoo.

Oasmaa, A., Czernik, S. 1999. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils-State of the Art. *Energy and Fuels* (1999). Vol. 13. pp 914 - 921.

Oasmaa, A. & Kuoppala, E. 2003. Fast Pyrolysis of Forestry Residue. 3. Storage Stability of Liquid Fuel. *Energy & Fuels* (2003). Vol. 17. pp 1075-1084.

Oasmaa, A. Peacocke, C. Gust, S. Meier, D. McLellan, R. 2005. Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications. *Energy & Fuels* (2005). Vol. 19. pp 2155-2163.

Oasmaa, A. Solantausta, Y. Arpilainen, V. Kuoppala, E. & Sipilä, K. 2009. Fast Pyrolysis Bio-Oils from wood and Agricultural Residues. *Energy & Fuels* (2010). vol. 24. pp 1380-1388.

Oasmaa, A. & Meier, D. 2005. Norms and standards for fast pyrolysis liquids: 1. Round robin test. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 73. pp 323-334.

Olenius, S. Logistiikkaesimies. L&T Biowatti. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 12.10.2010

Onay, O & Kockar, O. Slow, fast and flash pyrolysis of radeseed [verkkójulkaisu]. *Energy & Fuels*, 2005 [viitattu 12.11.2010]. Vol. 28. pp 2417-2433. Saatavissa: <http://elsevier.com>

Paju, M. Käyttöinsinööri. Botnia Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 8.10.2010

Pakarinen, T. Stora-Enso Oyj. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 11.10.2010

Pelli, P. 2010. Kiinteisiin biomassapolttoaineisiin liittyvä liiketoiminta Keski-Suomessa [verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja [viitattu 1.12.2010] Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/27826/TEM\\_59\\_2010\\_netti.pdf](http://www.tem.fi/files/27826/TEM_59_2010_netti.pdf)

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. 2008. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008 [verkkodokumentti]. TEM. [viitattu 10.9.2010]. Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus\\_311008.pdf](http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf)

- Pootakham, T & Kumar, A. 2010. Bio-oil transport by pipeline: A techno-economic assessment [verkkodokumentti]. Bioresource Technology. Vol. 101. pp 7137-7142. ISSN: 1873-2976 [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: [http://www.researchgate.net/publication/43533934\\_Bio-oil\\_transport\\_by\\_pipeline\\_a techno-economic\\_assessment](http://www.researchgate.net/publication/43533934_Bio-oil_transport_by_pipeline_a techno-economic_assessment)
- Pussinen, P. Tehdaspäällikkö. UPM-Kymmene Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 21.10.2010
- Pylkkänen, A. Hankintapäällikkö. Suur-Savon Sähkö Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 20.10.2010
- Qi, Z. Jie, C. Tiejun, W. & Ying, X. 2006. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research [verkkodokumentti]. Energy Conversion and Management (2007). Vol. 48. pp 87-92 [viitattu 25.10.2010] Saatavissa: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)
- Ranta, T. LUT Energia Professori. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 14.11.2010
- Rasmus, H. Myyntijohtaja. Saimatec Engineering Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 1.11.2010
- Repo, E. Energy Manager. UPM-Kymmene. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 8.10.2010
- Ringer, M. Putsche, V. & Scahill, J. 2006. Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis [verkkodokumentti]. Technical Report NREL/TP-510-37779 [viitattu 20.10.2010]. Saatavissa: [www.nrel.gov/docs/fy07osti/37779.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/37779.pdf)
- Roos, C. 2008. Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. WSU Extension Energy Program. Northwest CHP Application Center
- Räty, I. Käyttöpäällikkö. Enocell Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 8.10.2010
- Saarinen, J. Työ- ja elinkeinoministeriö. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 8.10.2010
- Saario, A. Oilon Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 20.9.2010
- Sahakuutio Oy. Kotisivu. [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: [www.sahakuutio.fi](http://www.sahakuutio.fi)
- Saimatec Engineering Oy. Kotisivu. [viitattu 2.11.2010] Saatavissa: <http://www.saimatec.fi/>
- Sarkkinen, J. Savon Sellu Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 12.10.2010
- Shihadeh, A., Lewis, P., Manurung, R., Beér, J. 1994. Combustion Characterization of Wood-Derived Flash Pyrolysis Oils in Industrial-Scale Turbulent Diffusion Flames, Proceedings, Biomass Pyrolysis Oil Properties and

Combustion Meeting. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, CP-430-7215, pp. 281-295

Sillanpää, J. Energiakolmio. Energiamarkkinaviraston keskustelupäivä 21.4.2010 [verkkodokumentti]. [viitattu 11.11.2010] Saatavissa: [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sillanpaa\\_21042010.pdf](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sillanpaa_21042010.pdf)

Simola, A & Kola, J. (toim.). 2010. Bioenergian tuotannon aluetaloudelliset vaikutukset Suomessa – BioReg-hankkeen loppuraportti. Helsingin yliopisto. Julkaisu 49.

Solantausta, Y. 1996. Electricity production by advanced biomass power systems. VTT. Espoo.

Stora-Enso Oyj. 2004. EMAS-Selonteko [verkkodokumentti]. [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: <http://www.storaenso.com/sustainability/Documents/stora-enso-timber-finnish-sawmills-emas-2004-fin.pdf>

Suomalainen, J. Sahakuutio Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 21.10.2010

Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Bioenergiaa Metsästä 2003-2004. Interreg-projekti

Taiponen, A. Tehdaspalvelupäällikkö. Finnforest Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 23.11.2010

Takoja, S. 2009. Energian käyttö sahatavaran kuivauksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energiatekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: LUT kirjasto

Teboil. Raskas Polttoöljy 180, tuotetiedote 2009/2 [verkkodokumentti]. [viitattu 25.10.2010]. Saatavissa: <http://www.teboil.fi>

Tekniikka & Talous. Suomelle lankeaa miljardilasku laivapäätöjen alentamisesta [verkkodokumentti]. 19.8.2010 [viitattu 20.12.2010] Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/ymparisto/article489689.ece>

Tikka, M. Käyttöpäällikkö. UPM-Kymmene. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 11.10.2010

Tirkkonen, H. Liiketoimintajohtaja. Suur-Savon Sähkö Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 8.11.2010

Törmikoski, P. Andritz Oy. Palaveri. 27.10.2010

UPM-Kymmene Oy. 2010. Vuosikertomus 2009 [verkkodokumentti]. [viitattu 9.10.2010] Saatavissa: [upm-kymmene.fi](http://upm-kymmene.fi)

Uusi-Rouva, E. Haverila, M. Kouri, I. & Miettinen, A. 2003. Teollisuustalous. 4.p. Tampere: Infacts Johtamistekniikka Oy. ISBN 951-96765-3-8

Vakkilainen, E. LUT Energia Professori. Henkilökohtaiset tiedonannot, sähköpostit ja puhelinkeskustelut. 20.08.2010 - 24.12.2010.

Valuutat.fi. Valuuttakurssit & Valuuttamuunnin. 13.12.2010. [viitattu 13.12.2010] Saatavissa: <http://valuutat.fi/>

van de Kamp, W. L. Smart, J. P. 1993. Atomization and Combustion of Slow Pyrolysis Biomass Oil. Advances in Thermochemical Biomass Conversion (Ed. Bridgwater, A.). Blackie Academic & Professional, London, 1993. pp 1265-1274.

Varis, M. Stora-Enso Oyj. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 8.10.2010

Vilhu, T. Projektipäällikkö. Terästorni Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti. 16.11.2010

Waagenar, J. Florijn, E. & Gansekoele, R. 2004. Bio-Oil as Natural Gas Substitute in a 350 MW Power Station [verkkodokumentti]. [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: <http://www.btgworld.com/uploads/documents/BTG%20Paper%20Harculo.pdf>

Öljy- ja kaasualan keskusliitto ry. Raskaan polttoöljyn hinta Suomessa [verkkodokumentti]. [viitattu 1.11.2010] Saatavissa: [http://www.oil-gas.fi/files/729\\_por.pdf](http://www.oil-gas.fi/files/729_por.pdf)

## LIITTEET

### liite1: Bioöljyn tuotantolaitoksen massa- ja energiavirrat

